la lettre
de l'Académie des sciences
n° 7 / printemps 2003

les impacts de l'effet de Serre

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

la lettre de l'Académie des sciences
n° 7 / printemps 2003

Sommaire

Éditorial

Alerte : la recherche scientifique européenne est en danger.
Que peut-on faire ?
Étienne-Émile Baulieu
page 2

Dossier

Sur la crédibilité des conséquences de l'effet de serre
Jean-Claude André et Claude Lorius
page 3

Climat du passé (400 000 ans) : des temps géologiques à la dérive actuelle
Jean Jouzel
page 8

De l'observation scientifique au Protocole de Kyoto
Entretien avec Paul Caseau par Paul Caro
page 10

Sources d'énergie et effet de serre
Bernard Tissot
page 12

Certitudes et incertitudes de la prévision démographique
Henri Léridon
page 14

Questions d'actualité

La régénération du myocarde par les cellules souches
Philippe Menasché
page 16

Le magnétisme terrestre
Jean-Paul Poirier et Jean-Louis Le Mouël
page 17

La vie de l'Académie

TFIIH, de la transcription à la clinique
Jean-Marc Egly
page 18

De la transgenèse animale à la biothérapie chez l'homme
Jean-Yves Chapron
page 19

Carnet

page 20

Médaille d'or du CNRS
page 20

Editorial

Alerte : la recherche scientifique européenne est en danger. Que peut-on faire ?

La communauté scientifique européenne s'inquiète de l'état de la recherche en Europe et des politiques actuellement menées dans ce domaine. Des scientifiques européens, à titre personnel, et les présidents élus de dix académies des sciences européennes ont écrit deux textes qui peuvent être consultés sur le site web de l'Académie[1]. Une première évaluation a été conduite par le groupe Science et Société de notre Académie, présidé par Jean-François Bach, avec la participation de Michael Sohlman, Directeur de la Fondation Nobel, un des principaux rédacteurs. Les suggestions proposées seront examinées par nos instances régulières, y compris en comité secret.

Les Chefs d'État et de Gouvernement des pays de l'Union européenne ont proposé, dans la déclaration de Lisbonne en 2000, de faire que l'Europe en 2010 dispose de « l'économie basée sur les connaissances, la plus compétitive du monde ». Dans ce contexte, ils ont demandé que le 6e Programme-Cadre permette de construire l'Espace européen de la recherche en mobilisant à cet effet 4 à 5 % du budget de l'Union. Plus récemment, reprenant cette question au cours de la réunion du Conseil européen de Barcelone au printemps 2002, il a été décidé que les investissements de recherche et développement dans l'Union européenne devraient atteindre 3 % du produit brut (GDP) en 2010, alors qu'il n'est que de 1,9 % aujourd'hui (la majorité de cette augmentation devrait être permise grâce au secteur privé). L'effort prévu est très important.

Bien entendu, ces déclarations et les intentions qui les sous-tendent sont de bonne augure, mais elles sont concrètement insuffisantes pour ralentir le retard de l'activité scientifique européenne, en particulier si l'on veut « rattraper et dépasser les États-Unis ». Tous les documents produits par l'OCDE et les Commissions de l'Union européenne le démontrent : non seulement l'écart est énorme mais il croît rapidement si l'on se réfère à la proportion de GDP impliquée pour l'Europe dans son ensemble, à la fraction de chacun des budgets nationaux affectée à la recherche, au nombre des emplois en recherche et développement, à la citation des articles scientifiques européens, au nombre des brevets, etc... sans compter le départ de plus en plus inquiétant des jeunes scientifiques les plus brillants Outre-Atlantique (on trouvera également sur notre site une série de documents chiffrés à jour fin janvier 2003, à la suite des deux textes pré-cités).

L'anxiété est grande parmi les scientifiques européens, car le futur de l'humanité ne peut être façonné exclusivement dans un seul pays. Le danger est partout pour l'Europe : sur les plans intellectuel, éthique, commercial..., avec toutes les conséquences politiques et individuelles.

L'évaluation du programme devra porter sur cinq propositions.

1- Le budget : au niveau de l'Union européenne la part du budget recherche et développement doit être augmentée. Un doublement dans les deux prochaines années semble raisonnable. Parallèlement, au niveau de chaque nation peut se faire le changement décisif ; pour quelques unes d'entre elles il sera nécessaire d'envisager une exception au pacte de stabilité, marquant ainsi la volonté politique de leurs gouvernements respectifs. Les scientifiques devront insister auprès de leurs représentants élus.

2- La Recherche fondamentale : dans le 6e Programme-Cadre, on observe un déséquilibre trop important en faveur du développement industriel. De plus en plus la recherche des grandes sociétés industrielles européennes se délocalise aux États-Unis, au contact des universités et des instituts les plus performants en recherche fondamentale. Les meilleurs scientifiques du privé partent aussi à l'étranger et les brevets initiaux seront tous bientôt américains. Il faut donc rééquilibrer le budget européen en faveur de la recherche fondamentale.

3- Les grands centres : nous manquons en Europe de grands centres analogues aux ensembles américains, qui attirent les meilleurs jeunes chercheurs du pays, et ceux du monde entier. La priorité devrait être donnée à la création et au renforcement de grands centres d'excellence compétitifs au plan mondial. Il faudra un certain courage pour décider d'une telle option, qui fera moins de place à une attitude distributive de petits laboratoires disséminés (qu'il n'est pas cependant question de négliger).

4- Les jeunes scientifiques : beaucoup s'en vont. Il est urgent d'offrir, notamment dans les centres d'excellence européens, les moyens d'un stage de recherche dans des conditions financières décentes, avec la garantie d'une situation pour plusieurs années dans leur pays, université ou institut d'origine, et avec les moyens d'équipement, d'assistance scientifique et technique leur permettant une recherche indépendante à leur retour.

5- Le Conseil européen de la recherche indépendant de l'administration actuelle de l'Union européenne, dont la création est à l'étude, interviendra pour définir, décider et subventionner les activités supplémentaires et complémentaires à l'actuel 6e Programme-Cadre indiquées plus haut.

Je suis à la disposition des uns et des autres pour préparer la discussion et aborder les problèmes qu'ils souhaitent soulever[2].



par **Étienne-Émile Baulieu**
Président de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France.

1 www.academie-sciences.fr
2 baulieu@kb.inserm.fr



Sur la crédibilité des conséquences de l'effet de serre

Le colloque inter-académique "Effet de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité[3] ?" a mis en facteur commun de ses débats la question de la crédibilité. De quel type de crédibilité s'agit-il ? Quels sont les champs de la connaissance qui sont concernés ?



Par **Jean-Claude André**[1] et **Claude Lorius**[2]

De quelle crédibilité parlons-nous ?

Il est tout d'abord nécessaire de rappeler que la crédibilité scientifique de l'effet de serre lui-même n'est pas remise en question : l'effet de serre résulte des propriétés des diverses molécules qui constituent l'atmosphère terrestre, il fait l'objet de lois physiques et peut être quantifié scientifiquement. Il est présent sur notre planète, et c'est en particulier grâce à lui que la température moyenne de la terre est de 33 °C plus chaude que s'il n'existait pas, à 15 °C au lieu de −18 °C si l'atmosphère était totalement transparente au rayonnement électromagnétique. L'exposé introductif de R. Dautray a permis de synthétiser les phénomènes et lois pilotant le transfert radiatif à l'échelle moléculaire, expliquant et quantifiant cet effet de serre naturel, et en particulier sa composante très importante résultant de l'action de la vapeur d'eau atmosphérique.

Il ne s'agit pas non plus de la crédibilité de l'augmentation de la concentration atmosphérique des différents gaz à effet de serre (GES) ; cette augmentation est mise en évidence directement depuis plus d'un demi-siècle par différents réseaux de mesure : elle a de plus été reconstituée via des proxis historiques et paléo-climatiques, comme cela sera discuté plus loin.

Il ne s'agit pas non plus, au plan qualitatif, de la crédibilité du changement climatique à venir, souvent résumée de façon très simplifiée sous le vocable "réchauffement global", qui résultera de

1 Correspondant de l'Académie des sciences, CERFACS (Centre européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), 31057 Toulouse cedex 1, andre@cerfacs.fr

2 Membre de l'Académie des sciences LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement), BP. 96, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex, lorius@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

3 Académie des sciences, 16-18 septembre 2002.

cette augmentation d'origine anthropique de la concentration atmosphérique en GES : tous les modèles climatiques prédisent qu'un tel changement climatique doit se produire, même si son intensité et son déroulement dans le temps ne sont pas encore quantitativement précisés. La communauté scientifique internationale reconnaît unanimement cette analyse, à travers la synthèse magistrale qu'en fait régulièrement le GIEC[4].

Il s'agit plutôt de la crédibilité des impacts, liés à l'amplitude de ce changement climatique résultant de l'effet de serre additionnel d'origine anthropique, attendus dans différents domaines, qu'il s'agisse des milieux naturels ou des différentes activités nécessaires à la vie sociale et économique. Il s'agit enfin de la crédibilité des solutions qui pourront être proposées pour réduire l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES, soit en agissant sur les niveaux d'émission, soit en augmentant le stockage et la séquestration de ces gaz hors de l'atmosphère.

Le concept de crédibilité inclut de fait deux aspects :
- d'une part il peut, et doit, être rapporté à la qualité intrinsèque du message des chercheurs. A partir d'un corpus de résultats qualitativement convergents mais présentant encore d'importantes incertitudes quantitatives, est-il possible de développer un message qui emporte, au-delà de celle du milieu scientifique, l'adhésion de l'ensemble des autres parties concernées ?
- mais, d'autre part, il doit aussi qualifier la façon dont ce message est reçu et compris par les milieux auxquels il est destiné. Les éléments relatifs aux sciences "exactes" ne sont alors plus les seuls à devoir être pris en compte, et l'apport d'autres disciplines, sciences sociales et sciences humaines, devient tout aussi prépondérants.
Ces deux aspects doivent être correctement appréhendés et pris en compte. Ils sont d'importances très comparables, pour que le message passe et passe bien, et se traduise par des actions.

L'évolution du climat

Ainsi que cela vient d'être brièvement rappelé, l'analyse scientifique relative à l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES et celle relative à la réponse principale du climat via le réchauffement global font maintenant l'objet d'un large consensus. Ce consensus est basé, d'une part, sur les observations de l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère et, d'autre part, sur la conjonction de très nombreuses études par modélisation numérique, qui montrent que le climat de la terre ne peut répondre à ce nouveau forçage qu'en déplaçant son équilibre vers un état plus chaud. Cette conclusion résulte en particulier du travail de synthèse conduit sous l'égide du GIEC, auquel participent plusieurs centaines d'experts. Créé en 1988, ce groupe a publié des milliers de pages sous forme de rapports et synthèses remis à jour périodiquement, et qui représentent le point de vue de la communauté scientifique dont font partie les orateurs de ce colloque. Le GIEC rassemble ainsi les principaux éléments de ce consensus, que l'on peut résumer sous une forme qualitative : "la concentration atmosphérique de GES augmente et les modèles indiquent qu'en réponse le climat terrestre va changer en se réchauffant".

Au-delà de cet accord, la crédibilité du message scientifique poursuit sa construction grâce à la mise à jour continue des savoirs. C'était en particulier l'objet de la première session du Colloque.

J. Jouzel a ainsi montré que les données de la paléoclimatologie ont récemment permis de réelles avancées. Sédiments marins, archives continentales, glaces polaires et les bulles d'air qu'elles emprisonnent ont ainsi permis de caractériser la succession des âges glaciaires et interglaciaires au cours des dernières centaines de milliers d'années et de montrer l'existence d'une relation entre température et teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane), dont Arrhenius avait eu l'intuition il y a près d'un siècle. Les résultats montrés par D. Jolly, utilisant de meilleures fonctions de transfert entre les pollens et le climat, montrent par ailleurs que le miocène moyen, marqué par de faibles teneurs en CO_2 de l'ordre de 150 à 220 ppm il y a 15 millions d'années, était aussi très vraisemblablement une période froide, confirmant ainsi la grande validité de la relation entre concentration en GES et température. L'apport très récent des archives glaciaires concerne la chronologie respective du réchauffement et de l'enrichissement de l'atmosphère en GES : le nouveau thermomètre isotopique permet ainsi de montrer que le signal de température en Antarctique précède d'environ 600 à 800 ans le signal GES, permettant ainsi de donner plus de crédibilité à l'enchaînement des événements : si les variations des paramètres de l'orbite terrestre sont bien les causes premières de la succession des périodes glaciaires et interglaciaires en déclenchant, comme l'avait annoncé Milankovich, les premières variations de température, c'est ensuite l'ensemble du système climatique et de ses rétroactions qui amplifie ce signal, conduisant au plein développement des ères climatiques. Deux mécanismes d'amplification sont bien identifiés. Il s'agit, d'une part, des variations de l'albédo liées à l'extension des glaces et, d'autre part, de l'évolution des teneurs en GES gouvernées par les modifications océaniques et continentales des émissions et puits de GES. Qui plus est, la découverte dans le passé de variations climatiques rapides concerne aussi notre futur ; elles ont été détectées sur les continents et calottes glaciaires aussi bien que dans les sédiments marins, comme l'a rappelé Edouard Bard. Enfin, la reconstruction détaillée du dernier millénaire traduit la variabilité temporelle et géographique du climat et permet de mettre en perspective les données des observations récentes. L'existence de ces faits n'est guère contestable, même si l'aspect quantitatif a pour l'instant ses limites. Il est, par exemple, difficile d'utiliser directement la sensibilité du climat passé au dioxyde de carbone pour appréhender le futur et de considérer les variations rapides plus précisément que comme de possibles surprises. **Figure 1.**

Figure 1 : Teneurs en gaz carbonique dans l'atmosphère depuis 1000 ans.

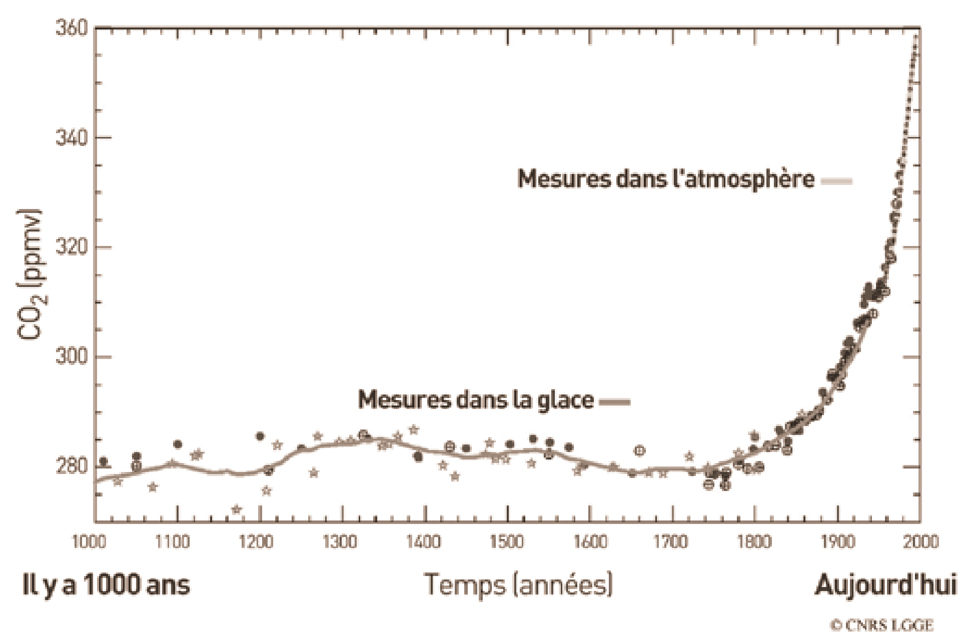
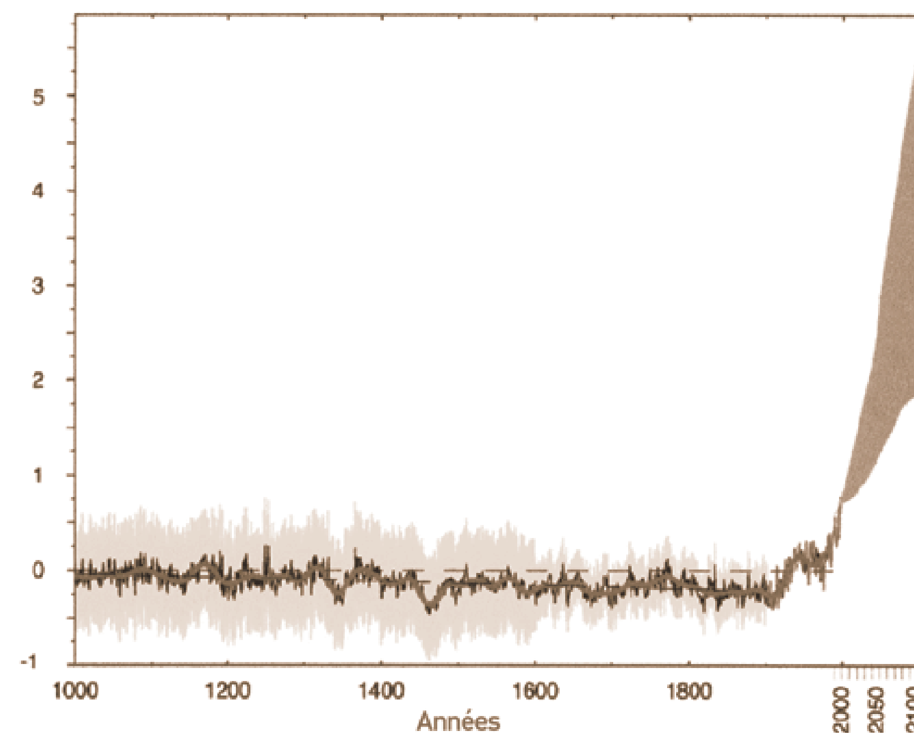


Figure 2 : Variations de la température annuelle moyenne sur l'hémisphère nord (Mann et al., 1999, Geophys. Res. Lett., 26, 759-762) comparées à la gamme estimée des changements globaux de températures pour le prochain siècle.



4 Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (en anglais IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change).

> *"(...) on ne voit rien de juste ou d'injuste qui ne change de qualité en changeant de climat. Trois degrés d'élévation du pôle renversent toute la jurisprudence, un méridien décide de la vérité (...) Plaisante justice qu'une rivière borne ! Vérité au deçà des Pyrénées, erreur au-delà."*
>
> Pascal, *Pensées,* V 294.

L'analyse des données météorologiques montre que la température moyenne a augmenté de 0,6 ± 0,2 °C au cours du 20ème siècle. Dans le contexte des derniers siècles, ceci représente un réchauffement sensible dont la crédibilité est confortée par d'autres observations, comme celles concernant la décroissance des surfaces couvertes par la neige et par la glace de mer dans l'hémisphère nord, le recul des glaciers et une montée du niveau des mers de 10 à 20 cm. La hausse observée, de plus en plus rapide, des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre est sans contexte d'origine anthropique. La mise en perspective avec les données des archives glaciaires couvrant les dernières centaines de milliers d'années montre sans ambiguïté une rupture très nette des équilibres naturels physiques, chimiques et impliquant la biosphère qui ont accompagné, via le cycle du carbone, l'évolution du climat du Quaternaire entre deux bornes relativement bien définies. **Figure 2.**

Les modèles sont un passage obligé pour tenter d'appréhender le futur. H. Le Treut a rappelé que les simulations récentes où sont alternativement, puis concomitamment, prises en compte les influences de facteurs naturels, telles les variations de l'activité solaire et des volcans, et celles de l'augmentation anthropique des GES, permet de conclure de façon très convaincante que seule l'association simultanée de ces deux facteurs permet de reproduire les changements climatiques observés au 20ème siècle. Pour le GIEC le réchauffement observé ne peut s'expliquer uniquement par des causes naturelles et l'influence des gaz à effet de serre y est maintenant « discernable », un terme qualitatif qui apparaît donc extrêmement vraisemblable. Pour conforter la crédibilité d'un impact anthropique et quantifier son importance, il reste prioritaire que soient développées la qualité des modèles, la reconstruction des climats du passé et la densité du réseau des observations.

La prévision de l'évolution du climat du 21ème siècle nécessite quant à elle de bien faire traiter à la fois les phénomènes "rapides", décrivant la réponse directe de l'atmosphère aux modifications de son bilan radiatif, et les phénomènes plus "lents", tels ceux décrivant la réaction des autres compartiments climatiques (océan, glace, écosystèmes,...). A la fin de ce siècle, les simulations de dizaines de modèles prévoient un réchauffement compris entre 1,4 et 5,8 °C ; valeurs impressionnantes, si l'on s'en réfère au passé, mais marquées par une large dispersion. Cette dispersion est due en partie aux insuffisances persistantes des modèles ; c'est ainsi que le doublement instantané des teneurs de l'atmosphère en dioxyde de carbone conduit, à l'état d'équilibre, à un réchauffement compris entre 1,5 et 4,5 °C. De quoi entraîner, au plan quantitatif, un certain flou dans le message transmis. Aux imperfections des modèles s'ajoutent celles des estimations pour le futur des concentrations en GES. S'agissant des modèles, malgré les développements importants accomplis ces dernières années, il faut souligner la difficulté d'inclure correctement certains aspects de la très complexe machine climatique, dont la plupart des composantes répondent individuellement à des lois de type "système dynamique" et exhibent des comportements chaotiques, ce qui entraîne une dispersion des résultats au niveau global, et plus encore au niveau régional.

Quatre grands types de questions nécessitent ainsi d'être approfondis pour comprendre quantitativement comment interagissent ces différentes composantes :

- l'augmentation de la concentration atmosphérique des GES peut-elle être prévue sur la base d'un fonctionnement global du cycle du carbone non modifié par le changement climatique lui-même ?
- comment préciser la réponse du système climatique au-delà de ses seuls aspects thermiques ? Comment le cycle de l'eau sera-t-il affecté ? A quelles échelles de temps d'éventuelles réactions majeures de l'océan et de la cryosphère doivent-elles être attendues ?
- comment caractériser les réponses climatiques "locales", c'est à dire à l'échelle où la plupart des systèmes naturels se révèlent vulnérables ? Ces systèmes naturels sont-ils capables d'adaptation, à quelle vitesse ?
- le régime des événements extrêmes (tempêtes, sécheresses,...) sera-t-il modifié ? La réponse à cette question est d'autant plus critique que nombre d'activités humaines, très, voire trop, bien adaptées aux conditions moyennes de leur environnement, sont devenues de facto extrêmement sensibles aux excursions climatiques. S. Planton a montré que, au moins dans le cas du territoire de la France, le nombre des événement extrêmes (comme les tempêtes et les épisodes pluvieux violents n'avaient pas montré de variation significative au cours des dernières décennies.

Si l'adhésion au message qualitatif est semble-t-il générale, un certain scepticisme reste ainsi décelable lorsqu'on en vient au quantitatif. Bien que la reconstruction du climat passé et l'évolution constatée au cours du dernier siècle soient scientifiquement très bien fondées et crédibles, ce n'est pas toujours le cas pour la modélisation et les scénarios utilisés qui conduisent à la fourchette haute du réchauffement attendu. Pour certains, la théorie de "Gaia" selon laquelle la terre et notamment son système climatique s'auto-régulent via la biosphère pour assurer un environnement optimum pour la vie, ne permettrait pas un réchauffement extrême. Sans entrer dans une discussion détaillée, ce point de vue est remis en cause avec la constatation que, si le climat de la Terre s'est auto-régulé durant les dernières centaines de milliers d'années, les teneurs actuelles et à venir de l'atmosphère en gaz à effet de serre rompent l'équilibre naturel du cycle du carbone gouverné, notamment, par la biosphère.

Par ailleurs un ouvrage récent, très médiatisé, est souvent cité par les sceptiques. S'il conteste de nombreux points concernant l'état de santé de la planète, Lomborg ne remet en effet pas en cause la réalité de l'effet de serre, mais la validité des scénarios et modélisations conduisant à un réchauffement de près de 6 °C à la fin de ce siècle. L'analyse présentée, qui inclut la compétitivité des énergies renouvelables dès les années 2050, estime le réchauffement à 2-2,5 °C, réduisant mais n'annulant pas, dans ce cas, les nécessaires contraintes sur les émissions de GES. On remarquera que ces valeurs, qui semblent tout autant qualitatives, sont proches de la fourchette basse des estimations du GIEC et ne remettent pas en cause la nécessité d'une action.

Les impacts du changement climatique

Il n'en reste pas moins que des changements sont attendus à l'échelle continentale, qui entraîneront très vraisemblablement d'importantes conséquences au plan des impacts.

Un premier effet du réchauffement climatique est de conduire à une élévation du niveau moyen des océans, par conjonction de la dilatation thermique de l'eau de mer et de la fonte des glaciers continentaux. C'est en tout cas les deux seuls facteurs importants pour le 20ème siècle, avant que ne se mettent en marche les phénomènes plus lents affectant les grandes masses glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Une "règle" simple (ou plus exactement une relation entre ordre de grandeurs !) est qu'un réchauffement de l'ordre de 1 °C s'accompagne d'une élévation du niveau de l'océan de l'ordre de 10 cm. A terme cela aurait un impact certain sur les populations humaines dont certaines sont déjà "les pieds dans l'eau".

Les régimes hydrologiques seront affectés, ne serait-ce que par suite des modifications du régime des précipitations, encore mal appréciées, et de celle du calendrier de la fonte nivale. Dans le cas d'étude pilote du bassin du Rhône, Etienne Leblois a ainsi rappelé que c'étaient les fluctuations météorologiques à court terme qui sont déterminantes pour apprécier les conséquences hydrologiques du changement climatique, et que c'étaient les plus délicates à quantifier actuellement.

Les communautés océaniques animales seront-elles aussi perturbées, car elles suivent les conditions thermiques de leur milieu. Pour s'en convaincre il n'est que de constater avec J.-Y. Georges et Y. Le Maho que les populations de bonites suivent l'isotherme 29 °C dans le Paci-

fique, que les morues sont sensibles à l'oscillation Nord-Atlantique, que les manchots se "calent" sur le front polaire antarctique et ses eaux à 4 °C,... D'autres communautés halieutiques sont en train de migrer vers le Nord, suivant le réchauffement des eaux, comme l'a rappelé L. Laubier. P. Leadley a montré qu'une grande proportion (65 %) des espèces de papillons se sont déplacées de plusieurs dizaines de kilomètres vers le Nord au cours du siècle passé.

Les espèces végétales réagissent quant à elles au double effet du réchauffement climatique et de l'enrichissement en CO_2, avec de possibles changements concomitants affectant la biodiversité. B. Seguin a ainsi montré que la production agricole pouvait être stimulée, et que les stades phénologiques étaient avancés. Les forêts peuvent exhiber quant à elles des accroissements de production de l'ordre de 1 % par an, phénomène attribué par J.-L. Dupouey à la conjonction des facteurs climatiques et à l'enrichissement en carbone et en azote. Le stockage du carbone dans les sols peut en être modifié, au-delà de la cartographie actuelle qui a été présentée par B. Saugier et M. Robert. Les communautés de mangroves resteront probablement quant à elles insensibles au changement climatique et à l'augmentation résultante du niveau des océans (de l'ordre du mm/an) du fait de leur taux de croissance rapide (de l'ordre du cm/an).

Climat et énergie

Si le message des climatologues sur l'effet de serre est clair, bien que restant sur certains points de nature encore qualitative, il faut bien garder à l'esprit que les scénarios à l'échelle des siècles prochains, et spécialement à l'horizon du 21ème, sont basés sur d'incertaines hypothèses concernant la démographie, le comportement des sociétés, les choix des sources d'énergie,... Il s'agit en fait d'un domaine scientifique extrêmement, voire excessivement ? vaste, puisque incluant, au-delà des sciences physiques, les sciences de la vie, les sciences économiques et les sciences sociales, de la démographie à la sociologie.

La recherche de solutions alternatives commande donc pour une très large part la crédibilité de la lutte contre l'effet de serre additionnel. Il peut s'agir d'une part de la définition et de la mise en place de stratégies de réduction des émissions de GES dans les divers domaines d'activité, agriculture, industrie, production d'énergie primaire, et surtout transports. Il peut s'agir aussi de méthodes de stockage des GES, de modification des pratiques agricoles et des processus industriels, et enfin de capture et séquestration des GES émis.

Comme B. Tissot et Y. Farge l'ont montré, le gaz naturel est très certainement l'énergie qui sera mobilisée de façon prépondérante pour assurer la fourniture énergétique à moindre coût en GES au cours de la première moitié du 21ème siècle. Le bouclage énergétique des besoins de la planète n'est par contre pas assuré pour la seconde moitié du siècle, tout au moins sans faire appel aux combustibles fossiles comme le charbon, beaucoup plus polluant en GES. C'est pourquoi, ainsi que cela a été exposé par Ph. Jean-Baptiste, on étudie le développement de techniques de captage à la source pour les GES, soit en amont, soit en aval des centrales de production, ou encore des techniques de stockage océanique ou géologique.

Les pistes pour des énergies nouvelles non-émettrices de GES sont variées, bien qu'à des stades d'avancement différents. Ces énergies ne semblent toutefois pas susceptibles de prendre la relève dans un avenir proche (deux ou trois décennies) et à un niveau suffisant pour relayer les énergies émettrices de GES, qu'il s'agisse de l'hydrogène et des piles à combustible (J.-C. Van Duysen) ou du photovoltaïque (A. Falanga). Ceci ne laisse guère de solutions autres que la réduction de la consommation pour un secteur très producteur de GES comme les transports (A. Feugier). L'utilisation de l'énergie nucléaire pose, au-delà du renouvellement du parc de production actuel, des problèmes touchant à sa perception par la société, en particulier relativement à la peur de la radioactivité et au problème du stockage des déchets (P. Bacher).

Climat, économie et société

La façon dont le message relatif au changement climatique est perçu par la société, et la crédibilité avec laquelle il l'est, est commandée par d'autres éléments que les seules avancées scientifiques et technologiques. D'une façon générale, l'environnement est devenu ces dernières années l'une des préoccupations majeures de notre société et, s'agissant du changement climatique et de ses conséquences, les intervenants sont nombreux : chercheurs, éducateurs, économistes, industriels, politiques,.... et citoyens. Comment perçoivent-ils le message des "experts" en climat ? **Figure 3.**

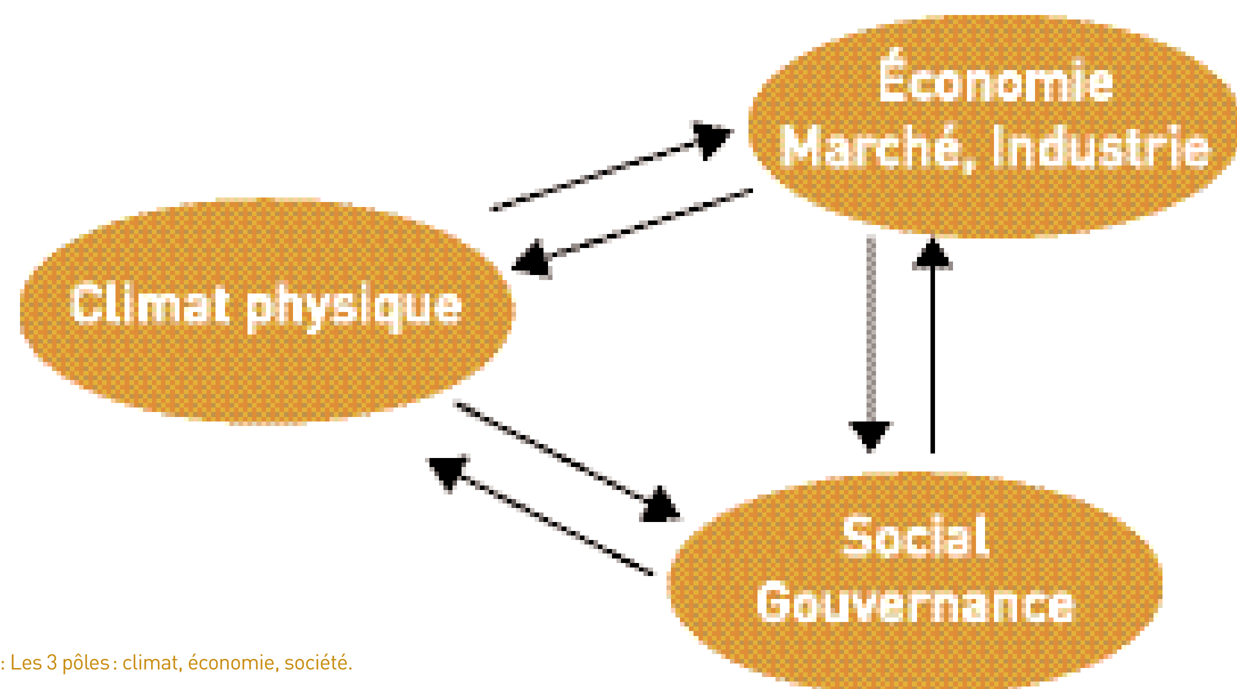


Figure 3 : Les 3 pôles : climat, économie, société.

L'économie est doublement liée au changement climatique : d'une part le développement économique sous-tend les scénarios d'émission de GES pour les décennies futures, et d'autre part l'économie est probablement l'un des moyens les plus directs et efficaces pour toucher la société et lui faire prendre conscience du changement climatique.

Les projections démographiques, conjuguées aux divers modes de développement économique, sont à la base des scénarios d'émission de GES. H. Léridon a montré que selon les diverses hypothèses, la population mondiale atteindrait entre 5 et 15 milliards d'individus à l'horizon 2100, avec une prévision moyenne aux environs de 10 milliards. Si les phénomènes de santé publique (durée de vie, épidémies,...) sont bien pris en compte dans l'établissement des scénarios démographiques, les problèmes liés à la "pollution" ne le sont habituellement pas. Seule la projection faite par le "Club de Rome" (cf. infra) s'en était préoccupée (avec dans ce cas une prévision de la population mondiale qui, après une croissance normale jusqu'en 2050, se stabiliserait ensuite à environ 3 milliards d'individus).

L'économie commande pour une large part la façon dont la société et ses responsables politiques perçoivent le changement climatique : le changement climatique n'est réellement important que parce qu'il est susceptible d'avoir

des conséquences sociales et économiques. La qualification et la quantification de ces impacts repose, au-delà des aspects "physiques" directs, sur leur transformation en dommages, dommages qu'il est ensuite possible d'inclure dans une analyse sociale et/ou économique. P. Jacquet a fait remarquer que, au-delà des questions encore ouvertes sur les taux d'actualisation à prendre en compte, il était de ce point de vue assez remarquable que malgré les diverses incertitudes, un mécanisme international (protocole de Kyoto) ait été mis en place relativement rapidement. L'entrée en vigueur de ce protocole, dont les objectifs modestes ne seront probablement pas atteints, requiert toutefois la signature de pays responsables ensemble de plus de la moitié des émissions de GES et le blocage actuel vient de la position des États-Unis, fondée essentiellement sur des raisons économiques. L'inter-dépendance d'états aux intérêts qui peuvent diverger est certainement un frein à la prise de décision plus rapide. Et pour les états, il n'est guère facile d'imposer des décisions qui seraient jugées socialement trop contraignantes, ne serait-ce que pour le confort de leurs citoyens.

C'est donc, in fine, la perception, tant du citoyen que du responsable politique, cette dernière souvent commandée par la première, qui va entraîner en retour la façon dont les sociétés réagissent et agissent pour lutter contre l'effet de serre additionnel. D. Bourg s'est interrogé sur la réelle existence de choix pour nos sociétés, prises entre les contraintes du marché au plan international et les constitutions des états aux plans nationaux. La conférence de citoyens représente probablement un moyen de construction d'un nouveau consensus social, susceptible de faire évoluer l'opinion publique et de lui faire prendre conscience de la réalité de la menace climatique. Les enquêtes d'opinion citées par D. Boy montrent que cette prise de conscience est loin d'être claire et partagée. De ce point de vue, le rapprochement des problématiques du développement durable d'une part, et du changement climatique d'autre part, tel que prôné par P. Jacquet, est de nature à faciliter une meilleure perception par la société. Quoiqu'il en soit, il y a là un champ de recherche où les sciences sociales sont encore beaucoup trop peu impliquées.

Le thème du réchauffement climatique est fréquemment repris dans les médias, avec toutefois assez souvent une importance trop grande donnée aux événements exceptionnels, voire catastrophiques, alors que leur fréquence accrue, prévue par les modèles, n'est pas pour l'instant confirmée par les données statistiques disponibles. Pour combler un maillon manquant, un effort d'éducation à travers les programmes d'enseignement s'imposerait comme canal logique dans les transmissions du savoir, alors que les chercheurs ont le plus souvent un accès limité au grand public, c'est-à-dire au citoyen.

Trois remarques en guise de conclusion

Tout d'abord, la crédibilité des prévisions relatives au changement climatique sera fortement influencée par la démonstration, le moment venu, que nous sommes effectivement entrés dans l'ère du changement climatique. Il est en effet encore impossible aujourd'hui d'affirmer avec une totale certitude statistique que le changement climatique anthropique est d'ores et déjà avéré. Même si la probabilité que ce changement ait effectivement commencé à se manifester soit significative, il n'en reste pas moins que le niveau important de la variabilité naturelle du climat peut encore rendre compte des fluctuations et perturbations climatiques actuelles. Comme par ailleurs les prévisions de montée en régime du changement climatique sont de caractère plus exponentiel que linéaire, il suffit d'attendre au plus une décennie ou deux pour confirmer l'entrée dans la nouvelle ère climatique.

Il est ensuite intéressant de faire le rapprochement entre la lutte contre le réchauffement climatique dû à l'effet de serre additionnel et la suppression des chlorofluorocarbures (ou CFC) pour lutter contre la destruction de l'ozone stratosphérique. Si en 1987 le protocole de Montréal a bien permis de bannir progressivement ces produits pour les remplacer par des composants chimiquement inactifs (mais malheureusement actifs vis à vis du transfert radiatif !), c'est très probablement parce que les événements se sont enchaînés de façon rapide et très "directe" : première mise en évidence de la diminution de l'ozone au-dessus de l'Antarctique en 1984-1985, et identification du mode de destruction photochimique de l'ozone stratosphérique par le chlore et le brome actifs en phase hétérogène à partir de composants primaires spécifiques (les CFC) en 1986. Le phénomène a pu ainsi être observé de manière indubitable et une chaîne directe a pu être établie entre le phénomène et ses causes, chaîne dont la crédibilité s'est alors imposée immédiatement tant aux milieux scientifiques que politiques. Comme, de plus, les industries productrices de CFC se sont révélées en même temps capables de trouver et de produire elles-mêmes des substituts répondant aux mêmes besoins (les hydrofluorocarbures, ou HFC), on conçoit bien que la question de l'ozone stratosphérique soit le plus souvent considérée comme le "bon" exemple de l'interaction entre le monde scientifique, capable d'alerter la société, et les mondes politique et industriel, réagissant ensuite pour prendre les mesures adéquates. Mais rien de tel pour l'effet de serre additionnel et le réchauffement climatique : le réchauffement est annoncé mais il n'est pas encore indubitablement présent aujourd'hui. Les phénomènes physiques en cause sont très variés et mettent en jeu de multiples interactions au sein de l'ensemble du système climatique, de telle sorte que la chaîne de causalité entre les GES et le changement climatique, dont certaines composantes ont une grande inertie, est très complexe et multiforme. Enfin, le remède passe par des solutions très contraignantes car mettant en jeu l'activité économique et sociale de l'ensemble des habitants de la planète, de la production d'énergie à l'agriculture, à l'habitat et plus encore aux transports, en particulier aux transports individuels. On peut simplement espérer que, fort des enseignements positifs de la crise de l'ozone, les scientifiques, les citoyens et les politiques sauront faire front dans ce cas beaucoup plus complexe et de beaucoup plus longue haleine.

Il faudra enfin prendre garde à l'écueil constitué par un certain type de démobilisation, comme celle qui a suivi quelques années plus tard l'annonce du Club de Rome, qui avait prédit en 1968 la fin des ressources minérales à l'horizon de la transition entre le 20ème et le 21ème siècles. Cette prédiction s'est certes révélée inexacte puisque rien de tel n'est survenu, et que c'est actuellement pour le début de la seconde moitié du 21ème siècle qu'est attendu l'épuisement des premières de ces réserves, en particulier de la réserve pétrolière. Mais si la prédiction du Club de Rome est souvent présentée comme un exemple d'alarme prématurée et inutile, il faut toutefois se souvenir que grâce à ce rapport de nombreuses études ont été lancées, et que la production énergétique a été diversifiée : l'action a ainsi pu se développer sans que le diagnostic soit entièrement correct.

L'effet de serre additionnel et le changement climatique posent des questions intermédiaires entre ces deux derniers exemples, dans un temps, où l'on peut espérer que milieux scientifiques, industriels et société sont mieux préparés à travailler ensemble. Coût économique, impact social et conséquences pour l'environnement seront des facteurs déterminants pour les choix faits. Compte tenu de l'inertie du système climatique, et donc de ses impacts, il s'agit à la fois d'agir vite, mais aussi d'agir au juste niveau.

Telle était l'ambition de ce colloque inter académique : faire un état des lieux aussi informé que possible, pour mettre en évidence les certitudes et les incertitudes qui affectent encore l'analyse scientifique, et examiner comment les solutions à mettre en place pourront être développées et diffusées jusqu'à leur bonne compréhension et prise en compte par le récepteur social et politique. Ces décisions relèvent d'un processus de longue haleine.

Pour conforter la crédibilité de ces impacts climatiques, il s'agit d'une part d'intensifier les recherches de base : compréhension, à partir du passé, des mécanismes climatiques et de la variabilité naturelle, détection à partir d'un réseau d'observations quadrillé et ciblé de l'impact anthropique permettant de transformer la notion de probable en certitude, modélisation intégrant paramètres physiques, chimiques et la biosphère. Peut-être faudra-t-il une ou deux décennies pour atteindre cet objectif... Un effort parallèle doit être entrepris dans le domaine des énergies dont dépendent crucialement les émissions de GES ; pour mieux cadrer les scénarios du futur qui nourrissent les prévisions des climatiques, sciences sociales et économiques sont aussi nécessaires. Pour le climat, comme pour le développement durable, le savoir devrait fonder les décisions d'une action évolutive arbitrant des approches écologiques, économiques, sociales et internationales divergentes. Pour cela, on peut craindre qu'il ne soit nécessaire d'attendre une, voire deux générations, alors que le changement climatique est déjà en route ■

Climat du passé (400 000 ans): des temps géologiques à la dérive actuelle[1]



par **Jean Jouzel**[2]

Depuis une quinzaine d'années, l'étude du climat du passé a fourni nombre de résultats pertinents vis à vis de son évolution future. L'existence de variations climatiques rapides, la corrélation entre climat et effet de serre et les enregistrements du dernier millénaire, sont autant d'aspects des climats passés pertinents vis-à-vis de son évolution future. L'importance de ce regard tourné vers le passé est primordiale pour appréhender correctement cette évolution. Indéniablement, les avancées passent, là, par une approche combinant les informations complémentaires extraites de divers types d'archives et un effort de modélisation s'appuyant sur une hiérarchie de modèles de complexité différente. Mon exposé a été centré sur les progrès faits dans le domaine de la reconstruction, de tout ou partie, du climat des 400 000 dernières années, choix largement dicté par la publication récente des enregistrements de température et de composition de l'atmosphère, déduits de l'analyse du carottage de Vostok en Antarctique de l'Est qui couvre les 4 derniers cycles climatiques[3]. J'ai largement centré cette synthèse sur des articles publiés au cours des deux dernières années, ou en cours de publication, et dans lesquels les équipes françaises sont fortement impliquées. Ceux-ci concernent aussi bien l'étude des carottages polaires que celle de séries marines et d'archives continentales.

Dans le domaine des carottes de glace, les résultats récents portent sur l'obtention de nouveaux enregistrements et sur l'analyse des déphasages entre gaz carbonique et climat d'une part et entre Antarctique et Groenland, de l'autre. Deux nouveaux forages profonds sont désormais disponibles en Antarctique (Figure 1). L'un, réalisé en 1995 et 1996 au site de Dome Fuji par une équipe japonaise a atteint 2 503 m, profondeur à laquelle le carottier s'est bloqué ; il couvre trois cycles climatiques. L'autre, conduit au Dome C dans le cadre du projet européen EPICA (European Program for Ice Coring in Antarctica), a atteint la profondeur de 3 200 m à la fin de la saison 2003. Il devrait donner accès à de la glace vieille de plus de 500 000 ans[4] voire beaucoup plus. Un second projet est en cours dans le cadre du projet EPICA, cette fois dans le secteur atlantique de l'Antarctique de l'Est ; ce forage de Dronning Maud Land a dépassé (février 2003) la profondeur de 1 500 m (âge estimé de l'ordre de 50 000 ans). L'enregistrement isotopique du Dome F et celui de Vostok sont extrêmement similaires sur leur partie commune qui couvre 330 000 ans (Figure 2). Ce résultat est remarquable au regard de la distance entre les deux sites (~1500 km) car il concerne aussi bien les grandes variations (terminaisons, interglaciaires et interstades) que celles moins marquées, mais facilement identifiables, des périodes glaciaires[5].

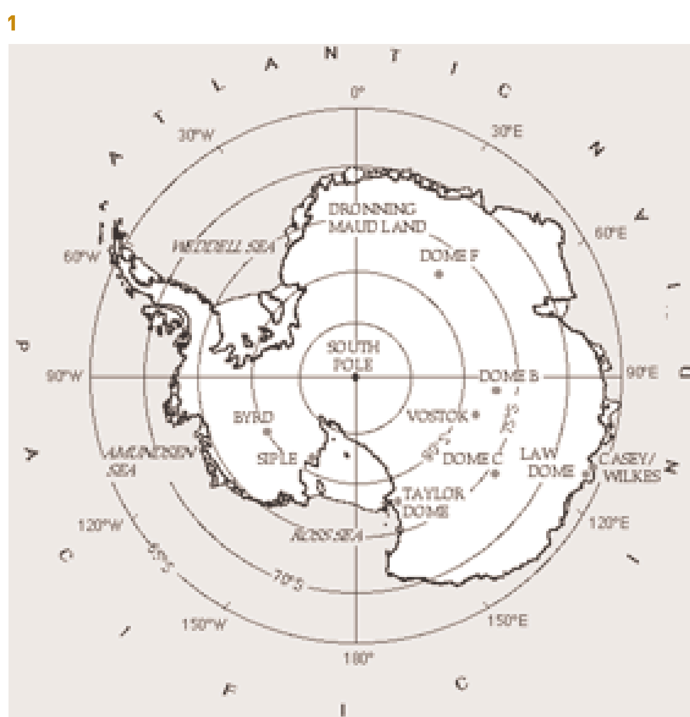
Figure 1 : Carte de l'Antarctique avec l'indication des différents sites où ont été réalisés des forages profonds

Figure 2 : Comparaison des profils isotopiques de Vostok et de Dome F au cours des 330 000 dernières années avec, en haut, les 170 000 dernières années et, au milieu, la partie la plus ancienne (figure adaptée de Watanabe et al. [13]).

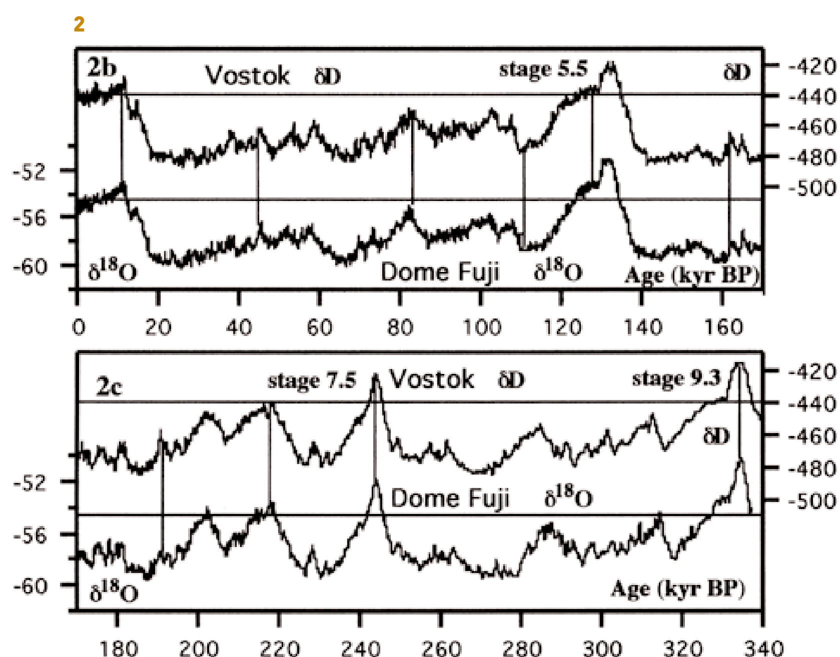
Figure 3 : La courbe inférieure représente l'enregistrement de la teneur en carbone 13 dans la stalagmite de la grotte de Villars avec l'indication des événements Dansgaard Oeschger identifiés par Genty et al. [6]. Les courbes suivantes correspondent de bas en haut à trois enregistrements de teneur en oxygène 18 avec successivement, GISP2, GRIP (avec deux datations SS09 et SS09sea) et Hulu Cave avec 2 chronologies différentes.

Figure 4 : Stalagmite de Villars

1



2



1 Lors du Colloque « Effet de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité ? », Académie des sciences, 16-18 septembre 2002.

2 Directeur de recherche CNRS, Institut Pierre Simon Laplace, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Gif-sur-Yvette.

3 Petit J.-R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis J., Delaygue G., Delmotte M., Kotyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M., 1999. Climate and Atmospheric History of the Past 420 000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica, *Nature*, 399 : 429-436.

4 EPICA Dome C 2001-2002 science and drilling teams, 2002. Extending the ice core record beyond half a million years, *EOS*, 83, 45, 509 et 517.

5 Watanabe O., Jouzel J., Parrenin F., Shoji H., Yoshida N., Johnsen S., Submitted. Remarkable temperature change similarities accross Antarctica during the last three glacial-interglacial cycles, *Nature*, Sous-presse.

Des questions subsistent sur l'existence possible de déphasages entre les variations du climat et celles des gaz à effet de serre, respectivement enregistrées dans la glace (teneur en deutérium qui reflète la température de l'Antarctique) et dans les bulles d'air qui y sont piégées (effet de serre). Celles-ci sont dues à l'incertitude importante (1000 ans au moins dans un site à faible accumulation comme Vostok) attachée à l'estimation de la différence d'âge entre la glace et l'air qu'elle contient. Basée sur une analyse précise de la teneur isotopique de l'argon qui s'avère être influencée par la température du site, Caillon et al.[6] ont récemment développé une méthode qui permet de se libérer de cette contrainte. Les résultats disponibles suggèrent que lors de la terminaison III, il y a environ 250 000 ans, l'augmentation de teneur en CO_2 survient 800 ans (± 200) après celle de la température à Vostok. La comparaison aux variations du méthane et de l'oxygène 18 de l'air confirme en outre que l'augmentation en gaz carbonique précède la déglaciation dans l'hémisphère nord et y aurait contribué à travers les rétroactions rapides liées à la vapeur d'eau, à la glace de mer et aux nuages. Soulignons d'ailleurs qu'une telle séquence apparaît logique du point de vue du cycle du carbone dans lequel l'océan austral joue vraisemblablement un rôle capital. Une fois que celui-ci commence à se réchauffer, en phase probablement avec l'Antarctique, il faut un certain temps (et une valeur de 800 ans semble ici raisonnable) pour que la circulation de cette partie de l'océan mondial se modifie et permette aux couches profondes d'arriver à la surface et de libérer les importantes quantités de CO_2 nécessaires pour en modifier la composition atmosphérique. En ce sens, la situation diffère de celle que nous vivons actuellement car dans le passé le forçage était interne contrairement à celui, externe, lié aux activités anthropiques.

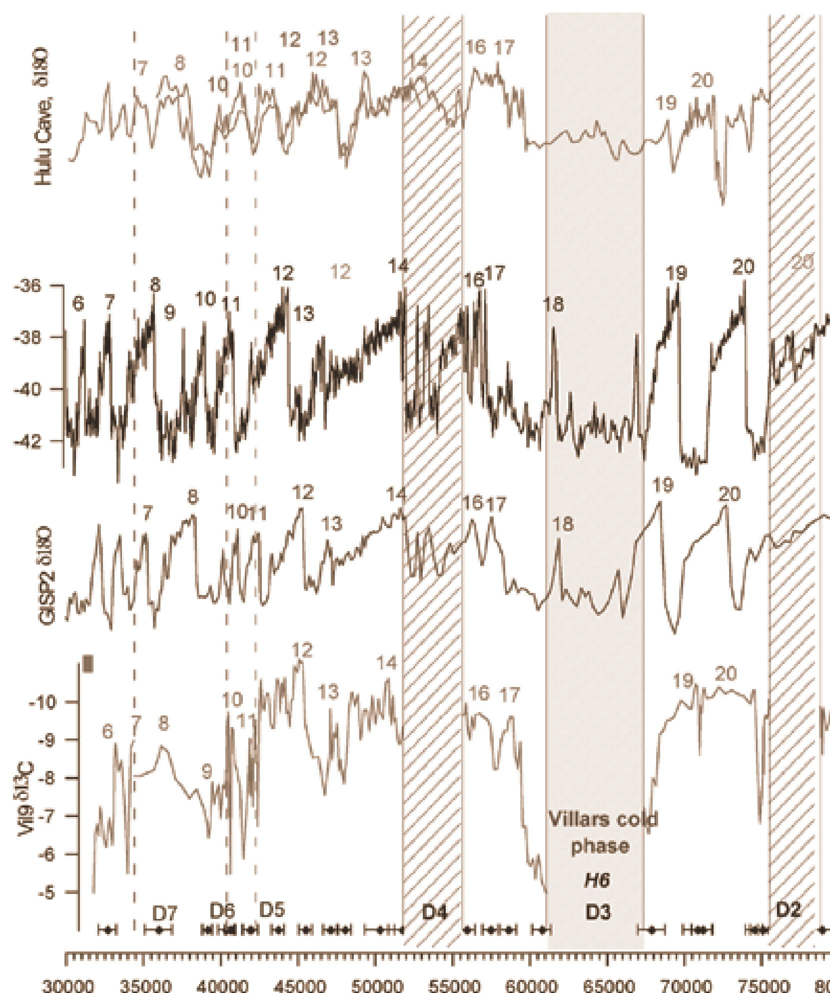
J'ai ensuite noté le rôle essentiel joué par l'analyse des bulles d'air dans l'établissement de corrélations entre les enregistrements des deux grandes calottes polaires, Antarctique et Groenland. C'est ainsi que Morgan et al.[7] ont récemment corrélé, tout au long de la dernière déglaciation, le carottage du Law Dome, site côtier à très forte accumulation, et celui de GRIP. Caillon et al.[8] ont eux exploré une méthode, basée sur la comparaison, dans une même carotte, de la composition isotopique des bulles d'air et de concentration en méthane, qui ne souffre pas des incertitudes liées à la différence d'âge glace/gaz. C'est le cas également de l'approche proposée par Raisbeck et al.[9] qui s'appuient sur l'existence d'un pic en Beryllium 10 autour de – 40 000 ans, dont la structure est désormais bien documentée. Ce pic couvre l'événement Dansgaard/Oeschger 10 au Groenland et, en Antarctique, l'événement qui en est la contrepartie. De façon assez surprenante, ceci implique, qu'à la précision près de la corrélation des pics beryllium 10 (±200 ans), ceux-ci sont synchrones.

La présentation des résultats récents dans le domaine des sédiments marins s'est limitée à quelques séries couvrant les 4 derniers cycles climatiques (niveau marin, températures océaniques) puis à des aspects spécifiques à la dernière période glaciaire (utilisation des propriétés magnétiques) et à la dernière déglaciation (estimations des âges réservoir ^{14}C). L'intensité paléomagnétique présente des similarités avec les variations des flux de chlore 36 et de beryllium 10 déduits de l'analyse de ces isotopes cosmogéniques dans les glaces du Groenland. Ces similarités fournissent un moyen de placer sédiments marins et glaces du Groenland sur une échelle de temps commune et de corréler les sédiments marins entre eux. Cette approche permet également de proposer une correction des âges carbone 14 sur la période 25-40 kA[10]. Les datations des sédiments marins basées sur l'analyse du carbone 14 sont sujettes à une autre correction dite "d'âge réservoir". Celle-ci résulte du fait que le rapport 14C/12C des eaux de surface (dans lesquelles vivent les foraminifères) diffère de celui de l'atmosphère. La méthode classique consiste à supposer que cet âge réservoir est constant pour une région océanique donnée mais deux études récentes montrent qu'il s'agit là d'une hypothèse erronée. Elles sont, l'une et l'autre[11, 12], basées sur la comparaison de séries océaniques datées au 14C avec des événements dont une chronologie absolue est disponible.

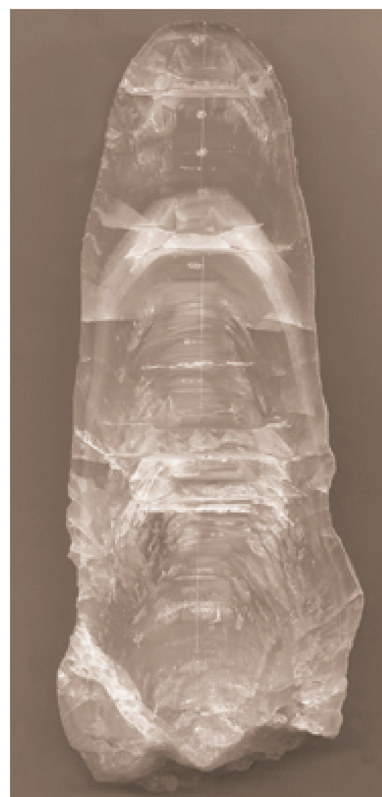
La présentation de résultats s'appuyant sur l'étude d'archives continentales a, elle aussi, été très restreinte. Après avoir noté les remarquables similarités entre l'enregistrement pollinique obtenu dans le Velay (France) et les variations de température à Vostok sur les 4 derniers cycles climatiques[13], nous allons brièvement faire état de deux études basées sur l'analyse de spéléothèmes. Elles ont en commun de s'appuyer sur des chronologies obtenues à partir de l'analyse uranium-thorium qui ont l'avantage d'être exemptes de toute correction et sont donc les plus précises aux échelles de temps concernées. Les événements de Dansgaard/Oeschger (D/O) sont très clairement inscrits dans les enregistrements isotopiques analysés (carbone 13 et oxygène 18 de la calcite) dans une stalagmite collectée dans la grotte de Villars[14] située en Dordogne et ce sur l'ensemble de la période étudiée (de 32 à 83 ka). Le DO/10 peut-être ainsi daté sans ambiguïté (de 40.4 à 41,5 ka) offrant par là même une datation du pic de production de beryllium 10 enregistré dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique. Bard et al.[15] ont étudié une stalagmite de la grotte d'Argentarola (Italie) qui a la particularité d'être actuellement submergée. La stalagmite, prélevée à une profondeur de 18,5 m par rapport au niveau de la mer actuel, n'a pu croître que lorsque ce niveau était inférieur à cette valeur. C'était le cas au cours des stades marins 7.2 et 6 mais cette croissance s'est, par contre, arrêtée au cours du stade 7.1 sur une période qui peut-être précisément datée entre 190 et 202 ka, en parfait accord avec la chronologie SPECMAP ce qui renforce l'idée d'un lien direct entre forçage astronomique et interstades marins.

En conclusion, la synthèse présentée est relativement exhaustive pour ce qui concerne les carottages glaciaires mais, par contre, extrêmement partielle vis-à-vis des enregistrements marins et continentaux où je me suis limité à commenter quelques résultats importants touchant à l'extension des séries climatiques à 400 000 ans, et à des avancées dans le domaine des chronologies et des corrélations entre enregistrements glaciaires, marins et continentaux. Par ailleurs, j'ai justifié le choix délibéré de privilégier les travaux dans lesquels des équipes françaises sont fortement impliquées, à travers la qualité de l'ensemble des publications récentes qui, dans ce domaine de la reconstruction des climats du passé, constitue une contribution très significative sur le plan international ■

3



4



6 Caillon N., Severinghaus J.-P., Jouzel J., Barnola J.-M., Kang J., Lipenkov V.Y., Submitted-b. Timing of atmospheric CO_2 and Antarctic temperature changes across termination III, *Science*, Soumis.

7 Morgan V., Delmotte M., van Ommen T., Jouzel J., Chappellaz J., Woon S., Masson-Delmotte V., Raynaud D., 2002. Relative timing of Deglacial Climate events in Antarctica and Greenland., Science, 297 : 1862-1864.

8 Caillon N., Jouzel J., Severinghaus J.-P., Chappellaz J., Submitted-a. Were the north and south climate changes asynchronous over the entire last glacial period ? *Geophys. Res. Lett.*, Soumis.

9 Raisbeck G.M., Yiou F., Jouzel J., 2002. Cosmogenic 10Be as a high resolution correlation tool for climate records. Goldschmidt Conference.

10 Laj C., Kissel C., Mazaud A., Michel E., Muscheler R., Beer J., 2002. Geomagnetic field intensity, North Atlantic Deep Water circulation and atmospheric D14C during the last 50 kyr, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 200 : 177-190.

11 Siani G., Paterne M., Michel E., Sulpizio R., Sbrana A., Arnold M., Haddad G., 2001. Mediterranean Sea Surface Radiocarbon Reservoir Age Changes Since the Last Glacial Maximum, *Science*, 294 : 1917-1920.

12 Waelbroeck C., Duplessy J.-C., Michel E., L., L., Paillard D., Duprat J., 2001. The timing of the last deglaciation in North Atlantic climate records, *Nature*, 412 : 724-727.

13 Cheddadi R., Andrieu V., de Beaulieu J.-L., Reille M., Jouzel J., Raynaud D., In preparation. Land-Ice comparison : the four last climatic cycles in the Velay long continental sequence and in the Vostok core, En préparation.

14 Genty D., Blamart D., Ouhadi R., Gilmour M., Baker A., Jouzel J., Van-Exter S., Sous-presse. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from speleothem data, *Nature*, Sous-presse.

15 Bard E., Antonioli F., Silenzi S., 2002a. Sea-level during the penultimate interglacial period based on a submerged stalagmite from Argentarola cave (Italy), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1-12.



De l'observation scientifique au Protocole de Kyoto

Entretien avec Paul Caseau [1]

par **Paul Caro** [2]

Question :
Quels ont été les sujets traités par le Colloque interacadémique de septembre 2002 sur le thème du changement climatique ?

Paul Caseau :
Le colloque s'est proposé de porter un jugement sur les quatre questions qui se posent en matière de changement climatique. La première porte sur la réalité du phénomène, le changement d'état que l'on peut observer sur la planète, la seconde sur les impacts en retour, savoir ce qui peut arriver. Les deux dernières portent sur ce qu'il faut faire si ces menaces sont confirmées, sur la façon dont on peut organiser des contre mesures. Ce qui débouche sur le jugement que l'on peut émettre sur les processus déjà engagés comme celui de Kyoto. L'Académie des sciences était plus motivée par les deux premières questions et les réponses ont été assez précises, assez comparables à celles que l'on peut trouver auprès d'autres institutions scientifiques, par exemple aux États Unis.

Le gouvernement américain a estimé en décembre 2002 qu'il faut encore dix ans de recherche avant de pouvoir prendre une décision...

L'opinion scientifique n'évolue pas du tout comme cela : elle sait que dans dix ans, quel que soit le programme, il restera encore des choses incertaines et elle sait également, toutes les Académies l'on dit y compris l'Académie des sciences américaine, qu'au niveau de l'état de la planète il y a un maintenant un vrai consensus. On a observé des phénomènes, on les comprend, mais il y a énormément d'effets que l'on n'est pas capable de prévoir.

Les critiques se répartissent donc en deux camps. Ou bien elles portent sur les progrès qu'il faudrait faire : beaucoup d'entre elles ont été absorbées par le processus de recherche du GIEC[3]. Ou bien elles affirment que l'évolution du climat sera toujours inconnaissable et là elles rejoignent la position officielle américaine.

En ce qui concerne le diagnostic, presque aucun scientifique ne défend la thèse d'une évolution qui serait impossible à appréhender. Il y a dix ans, les critiques étaient globales, mais peu à peu des réponses ont surgi, le GIEC a fait siennes les difficultés restantes, de sorte qu'il n'est plus attaqué que par des marginaux. Tout le monde considère que ce qu'il a trouvé est suffisant pour que le problème soit clairement posé. Cela signifie que l'on pourra faire des prévisions au niveau global, tandis qu'au niveau continental ou régional la réponse reste encore très nuancée (on peut le déduire de ce qui a été dit au Colloque à propos des modèles). Les industriels ont rejoint cette position, et considèrent que c'est la seule responsable, ce qui, pour l'industrie américaine, a représenté une évolution importante.

Il y a donc consensus sur le fait qu'il faut faire quelque chose, mais pas sur ce qu'il faut faire. Savoir "ce que nous allons faire" reste bien la question qui divise.

1 Membre de l'Académie des Technologies.
2 Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche CNRS.
3 GIEC : Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (IPCC en anglais), groupe d'experts scientifiques créé en 1988 à la demande du G7, tous les Membres des Nations Unies en sont adhérents.
http://www.ipcc.ch

Que peut-on faire, ou ne pas faire ?

Le problème essentiel, c'est de diminuer les émissions. Il faudra également s'adapter au changement de climat, mais c'est une autre question (qui viendra en son temps). Les émissions sont la résultante d'une chaîne à quatre termes : populations, revenus (PIB), énergie, émissions. A quel endroit faut-il intervenir pour baisser le rejet final ? Et d'abord, est-ce qu'il y a des évolutions "naturelles", qui vont faire que les émissions baisseront toutes seules, ou du moins augmenteront moins qu'on ne le croit ?

La réponse est : oui ! Nous constatons d'abord une baisse très rapide de la natalité, partout. Dans cinquante ans, la question des émissions pourra se poser d'une manière moins aiguë : il n'y aura pas, comme on l'a pensé, 11 milliards d'individus sur la planète. La deuxième évolution spontanée, c'est la dématérialisation. Le progrès technique fait que plus on vit dans un pays évolué et plus on est riche, moins la proportion de choses matérielles, en particulier l'énergie et donc les émissions, est forte par rapport au PIB. Quand on est pauvre on émet peu parce qu'on a peu de revenus, mais quand on est riche les émissions sont saturées à un maximum et n'ont plus rien à voir avec le niveau de vie. Ce qui signifie tout simplement que plus les inégalités s'accroissent plus les émissions baissent ! Si on dit que le revenu par tête des Chinois sera doublé en trente ans cela signifie beaucoup d'énergie et d'émissions ; mais si en fait ce doublement est obtenu parce que le revenu de la population chinoise qui vit sur la côte a été multiplié par cinq et que celui de l'intérieur n'a pas changé, cela fait beaucoup moins (d'un facteur deux au moins). Une évolution de ce type est désastreuse pour l'humanité mais favorable pour l'effet de serre. Elle est, de plus, très probable ! Les inégalités s'accroissent entre les Nations, mais aussi au sein même des Nations. Il y a donc une façon de "traiter la question" qui consiste à penser qu'il n'y a pas de problème pour les riches et que les pauvres, on ne les écoutera pas... Une fois exprimée, cette position nous paraît extrêmement cynique, mais c'est, de fait, une position que beaucoup de gens adoptent, apparemment sans s'en rendre compte...

Est-ce qu'il existe des solutions technologiques ?

Il faut envisager des technologies de grande masse. Il y en a, à mon avis, trois. La première c'est la séquestration, on sépare le CO_2 et on le réinjecte. Elle est chère mais massive. La deuxième, ce sont les économies d'énergie basées sur une augmentation des prix. La troisième c'est l'énergie nucléaire pour les pays de l'OCDE plus l'Inde et la Chine. En principe cela inclut les surgénérateurs mais dans le cadre du 21éme siècle le nucléaire classique peut suffire.

Est-ce que ces solutions n'impliquent pas des problèmes d'acceptabilité ?

Il viendra un moment où l'acceptabilité sera acquise, parce que l'on dira : « quand il faut, il faut ! ». Sinon il faudra admettre que l'on fait confiance aux évolutions spontanées évoquées plus haut, c'est à dire que l'on met tout sur le dos des pauvres ! Pour moi, l'acceptabilité n'est pas la question la plus importante. Le problème c'est de choisir entre l'organisation des contre-mesures et la non-organisation.

L'organisation, c'est Kyoto. D'abord, Kyoto est un processus qui entraîne une série de rendez-vous successifs. « Bienvenue dans un monde contraint par le carbone, nous y entrons, nous n'en sortirons pas de longtemps. » C'est ensuite une logique où l'on fixe tous les dix ans le maximum des émissions de carbone acceptables : on le répartit ensuite entre les pays, et les pays le répartissent entre leurs secteurs industriels. Les injustices de répartition (inévitables) sont corrigées de deux façons. D'abord, on remet les choses en jeu tous les dix ans. Ensuite, le système est basé sur des quotas et des permis, les permis atténuent les difficultés induites par les quotas et permettent d'atteindre l'optimum économique. Le rôle des quotas initiaux est de dire à peu près qui va payer : c'est pour cela que la négociation initiale est difficile, car il faut faire la répartition des sacrifices dès le début de la partie.

Un processus comme celui de Kyoto donne au politique une grande place. Comme il y a nécessairement des gagnants et des perdants, il faut que le politique puisse s'appuyer sur l'opinion. Il faut pouvoir affronter et résoudre les conflits entre États, ainsi que les conflits à l'intérieur des États, entre secteurs économiques et corporations d'ayant-droit.

Et si le processus de Kyoto échoue ?

C'est bien ce qui définit "l'autre méthode", qui commence par refuser Kyoto. Mais en fait, c'est pour faire du « Kyoto sans Kyoto », c'est à dire pour essayer d'obtenir des résultats équivalents, pour moins cher et d'une manière plus efficace. Le pari n'est pas aussi audacieux qu'on pourrait le croire, car il existe beaucoup de voies à explorer.
D'abord on peut utiliser un système d'engagements volontaires et de permis volontaires, sur un marché de permis volontaires. On peut organiser cela sans intervention des États : au sein des entreprises, ou entre plusieurs entreprises. Autre possibilité : si le coût des hydrocarbures augmente, les émissions baisseront, automatiquement. On peut aussi souscrire des engagements bilatéraux : de pays à pays ou de clients à clients internationaux. Et pour le retour au nucléaire on n'a pas besoin de Kyoto ! Il y a donc quatre "commandes", quatre ficelles à tirer.

Ce système n'a pas besoin d'un engagement du type Traité, il est moins contraignant, mais est-il aussi efficace ?... En fait les deux voies, Kyoto ou pas, forment un "continuum" au sein duquel le soutien de l'opinion publique joue un rôle essentiel.

L'État n'est pas nécessaire pour une relance du nucléaire et peut laisser agir le marché pour les prix de l'énergie. Les relations internationales peuvent être marquées par une sorte crispation contre le multilatéralisme, et la voie de Kyoto peut paraître trop exigeante. Par contre, en acceptant le principe des arrangements bilatéraux et des engagements volontaires à l'intérieur d'un pays, on perd l'avantage de la transparence, c'est à dire le sentiment que les efforts des autres ont été évalués sur une base comparable. C'est l'avantage de Kyoto de proposer une répartition équilibrée qui, si elle est acceptée, emporte la conviction.

A mon avis, en dépit des critiques, l'opinion publique acceptera l'idée "qu'il faut bien faire quelque chose". C'est à dire, au moins « Kyoto sans Kyoto ». La question de la transparence et de l'équité restera posée... Ce qui est irréversible dans cette affaire, c'est que les travaux du GIEC ne seront pas remis en cause.

L'humanité a déjà connu des changements climatiques importants...

Ceux qui disent qu'après tout le réchauffement ne gêne pas tout le monde, et qu'il sera toujours possible de s'adapter, parlent (sans le savoir) au nom d'une minorité à son aise, et contre la grande majorité. Certes une minorité pourra s'adapter, au besoin se déplacer, mais la masse immense des autres devra subir. Il y a quelques milliers d'années l'humanité, peu nombreuse, pouvait survivre aux épreuves des changements climatiques, mais l'humanité d'aujourd'hui y répondra par le "chacun pour soi", ce qui, à l'échelle de 10 milliards d'individus, pourrait produire des résultats apocalyptiques. La fermeture des frontières, le repli sur l'égoïsme national, seront une première façon de se protéger. La sagesse de tous c'est bien sûr que cela ne se produise pas, au moins qu'on arrête le processus. Si on ne fait rien la situation ne peut qu'empirer... Si l'on se réveille en 2080 que pourra-t-on faire qui ne soit pas plus facile à faire aujourd'hui ? Les Américains n'ont rien fait depuis 1990, et ils doivent reconnaître aujourd'hui que c'est une grosse erreur !

Que pensez-vous de la question des transports ?

Là, on rentre dans la voie des économies d'énergie. On peut les faire de trois façons, de plus en plus "douloureuses" ! La première compte sur les améliorations qu'on peut encore apporter au moteur à explosion, sur l'élimination des vieux véhicules, la limitation de vitesse rigoureuse etc... pour apporter des économies sérieuses. La seconde, c'est l'arbitrage entre les modes de transport : train - voie d'eau - avion -voiture, etc... La troisième façon, c'est de limiter le besoin de transports et donc les échanges, de revenir à des productions plus locales ou régionales, renoncer aux haricots du Kenya livrés par avion... Actuellement on aime bien passer des vacances brèves et lointaines pour pas cher. Cet avantage social amusant risque de disparaître : les changements de comportement sont dirigés par les prix.

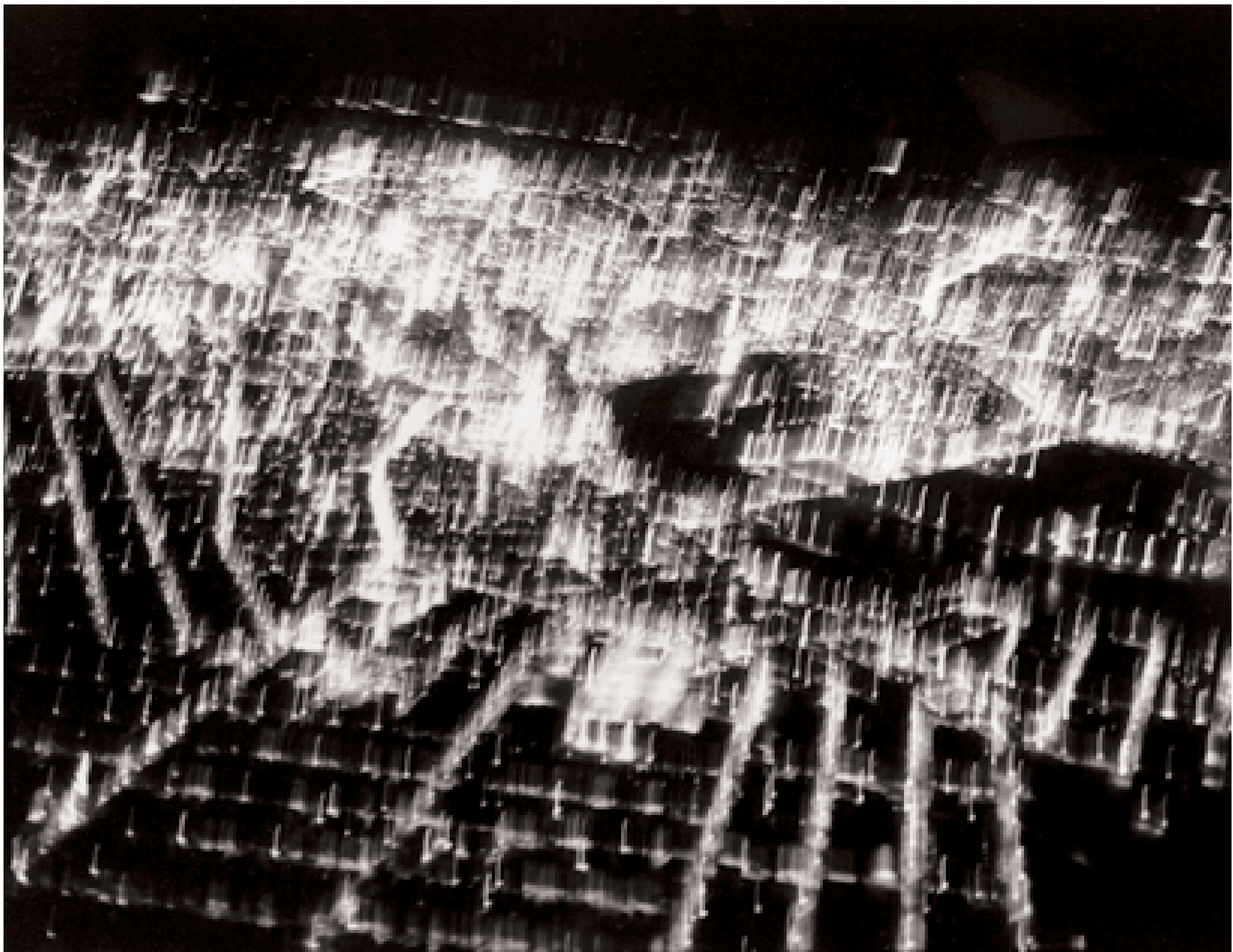
Mais je crois que l'humanité sacrifiera bien d'autres choses avant de sacrifier les transports... Elle essaiera toutes les armes de la technologie. On peut évidemment penser à utiliser des carburants bio ou de l'hydrogène fabriqué à partir du nucléaire mais ce sera, nécessairement, beaucoup plus cher que le pétrole actuel, et il faudra se réadapter.

Vous soulignez finalement le lien fort de la question climatique avec les problèmes de société ?

Oui, et pour deux raisons. La première est que si la société refuse de voir le problème, les gouvernements n'ont aucun moyen de définir ou d'imposer des solutions. « Kyoto sans Kyoto » ne se fera pas et, à plus forte raison, "Kyoto tout court" parce que les gens refuseront de s'entendre sur un partage des sacrifices.

La seconde c'est que ni les technologies ni l'économie ne peuvent évoluer indépendamment de la société. On nous dit parfois que, dans la lutte contre l'effet de serre, "on peut faire ce que l'on veut, mais..." qu'il ne faut pas changer « le mode de vie américain ». Or, si le système des prix change, le mode de vie change. Comme Bertrand de Jouvenel l'a souligné, si on avait voulu conserver les consommations du 18ème siècle, la révolution industrielle aurait été quasi impossible. Le progrès c'est acheter les biens qui deviennent bon marché et abandonner les biens chers, comme peuvent le devenir les produits et services qui consomment du carbone... ■

Sources d'énergie et effet de serre[1]





par **Bernard Tissot** [1]

90% de l'énergie primaire consommée dans le monde est génératrice de gaz à effet de serre. Elle est, en effet, surtout dérivée du charbon, du pétrole et du gaz, quelle qu'en soit la forme finale : électricité, carburants pour les transports, combustibles de chauffe, etc. Les émissions de gaz carbonique résultantes correspondent à environ 8 milliards de tonnes de carbone rejetés chaque année dans l'atmosphère. Dans un scénario de « laisser-faire », ces rejets pourraient atteindre 15 ou 20 milliards de tonnes de carbone au milieu du siècle. Avec l'augmentation de la population de la Terre qui atteindrait 9 ou 10 milliards d'habitants à la fin du siècle, les rejets pourraient dépasser largement ces valeurs en 2100, surtout si l'on doit se reporter massivement sur le charbon. Une concentration en gaz carbonique approchant 1 000 cm^3/m^3 dans l'atmosphère est alors possible (contre 370 cm^3/m^3 actuellement). Une telle perspective serait celle d'une catastrophe climatique.

La mobilisation des ressources ultimes en pétrole et en gaz ne permettra pas d'atteindre la fin du siècle, si l'on utilise aussi massivement ces combustibles. La solution de la facilité serait de se

1 Lors du Colloque « Effet de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité ? » à l'Académie des sciences, du 16 au 18 septembre 2002.
2 Membre de l'Académie des sciences, directeur général honoraire de l'Institut français du pétrole.



reporter sur le charbon dont les réserves sont plus importantes, avec un double handicap : la pollution « classique » et les émissions de gaz carbonique, qui sont doublées si l'on passe d'une centrale électrique à gaz naturel à une centrale à charbon. On devra donc y faire appel de façon mesurée et toutes les énergies seront nécessaires pour satisfaire les besoins dans des conditions acceptables.

Les deux demandes les plus difficiles à satisfaire, dans cette double perspective d'épuisement des ressources et de changement climatique, sont la fourniture de carburants pour les transports et d'électricité aux grandes villes.

Michel Francony[3] évoque, à la demande des organisateurs, le problème spécifique de la fourniture d'électricité aux mégapoles de plusieurs millions d'habitants. Celui-ci se pose avec acuité dans de nombreux pays en développement où la croissance de la demande peut atteindre 10 % par an, dans des pays majoritairement pauvres. Plusieurs problématiques sont imbriquées : la fourniture proprement dite d'électricité, celle de froid et de chaud (réseaux de chaleur), l'encombrement du sol et du sous-sol, l'élimination des déchets.

Parmi les aspects liés au développement durable, on peut citer en particulier un financement soutenable, avec la nécessité d'un recours à l'investissement privé (les organismes internationaux s'en désintéressent) et au financement public, qui permet de prendre en compte des temps très longs. Dans les bidonvilles (favellas) qui constituent des îlots où la propriété n'existe pas, le problème de la distribution est complexe.

On peut dire que les prises de conscience des problèmes n'existent pas encore, et que les réponses de fond ne sont pas disponibles aujourd'hui.
Les combustibles fossiles sont évoqués dans deux exposés : celui de Philippe Jean-Baptiste[4] envisage la séparation et le stockage du gaz carbonique – important gaz à effet de serre- pour poursuivre l'usage du charbon, du pétrole et du gaz ; celui d'Alain Feugier[5] la maîtrise de ces émissions dans le domaine des transports.

Philippe Jean-Baptiste rappelle que les centrales électriques utilisant des combustibles fossiles émettent plus de 30 % du gaz carbonique lié aux activités humaines. Différentes technologies sont actuellement proposées pour la capture et le stockage de ce gaz : elles ne sont guère applicables que pour des sites d'émissions concentrées, et les centrales électriques thermiques paraissent la première cible à étudier.

L'auteur évalue l'ordre de grandeur du potentiel de stockage mondial au niveau des milliards de tonnes de CO_2. La même procédure serait applicable à d'autres industries fortement émettrices de ce gaz : chaufferies, cimenteries, hauts fourneaux, etc. …)

Alain Feugier vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre dues aux transports. Le moteur Diesel est avantagé de ce point de vue, grâce à son excellent rendement énergétique, mais il est nécessaire de diminuer les émissions de polluants classiques. Le moteur à essence devrait être amélioré par une diminution de sa consommation de carburant. Cela pourra être réalisé soit par le perfectionnement des techniques d'injection directe de carburant, la réalisation de systèmes de distribution variable, ou encore par de nouveaux procédés de combustion. Les progrès réalisés dans le contrôle électronique joueront un rôle important dans ces innovations.

Jean-Claude Van Duysen[6] et ses collè_gues de l'Institut européen de recherches de Karlsruhe et de l'EDF font le point sur le problème de l'hydrogène « vecteur d'énergie » et des piles à combustible. Il s'agit d'un domaine où coexistent les recherches avancées, le rêve, et même la confusion.

L'hydrogène est, comme l'électricité, un vecteur d'énergie qui doit être produit à partir d'énergies fossiles, renouvelables ou nucléaires. S'il est vrai qu'une pile à combustible alimentée avec de l'hydrogène ne rejette que de l'eau, il faut aussi prendre en compte la production, le transport et le stockage de l'hydrogène. La pile à combustible est un moyen de production d'électricité peu bruyant et à haut rendement. Elle peut donc présenter de l'intérêt pour réduire les émissions de gaz carbonique, même si elle n'est pas alimentée par l'hydrogène.

Si nous savons, dès maintenant, produire de l'hydrogène propre, de nombreux travaux sont encore nécessaires pour optimiser les piles à combustibles et augmenter la durée de vie de celle-ci. Les réalisations actuelles doivent plutôt être considérées comme des prototypes.

Anne Falanga[7] présente les perspectives offertes par les énergies renouvelables et leurs limitations. Elle s'attache particulièrement à l'énergie solaire et à la production d'électricité par la voie photovoltaïque. Ce mode est bien adapté pour les habitats dispersés dans les pays dépourvus de réseau de distribution. L'apport de ces systèmes est actuellement marginal car le coût en est élevé ; la durée de vie de filières à bas coût (cellules plastiques), dont le rendement est plus limité, pourrait être allongée.

Pour les transports, les piles à combustibles alimentées à l'hydrogène devraient être perfectionnées pour en diminuer le coût et augmenter la durée de vie.

Pierre Bacher[8] envisage l'avenir de l'énergie nucléaire. Dans le contexte énergétique prévisible, et si l'on veut limiter l'effet de serre dû aux activités humaines, l'énergie nucléaire devrait fournir en 2050 de 3 à 5 milliards de tonnes d'équivalent pétrole, contre 0,7 aujourd'hui. Un tel développement n'est possible que si les obstacles qui la freinent actuellement sont surmontés et si de nouvelles voies techniques sont préparées.

Les obstacles comprennent notamment la sûreté des installations, la radiotoxicité et les déchets nucléaires. Les installations comme celles qui existent en Europe occidentale et en Amérique du Nord ont fait leurs preuves. Cependant l'accident de Tchernobyl et l'existence de centrales comparables en Europe orientale suscitent des craintes, même si le risque d'accident n'est pas majeur. Les solutions techniques qui existent permettent de limiter à des valeurs très faibles la radiotoxicité rejetée dans la biosphère.

Enfin les déchets nucléaires font l'objet d'une focalisation des inquiétudes qui s'oppose actuellement à leur isolement en formation géologique profonde. On en connaît cependant bien les caractéristiques essentielles : pendant 2 à 3 siècles, forte radioactivité des produits de fission (césium, strontium, iode) ; à long terme (10 000 ans) les actinides mineurs (américium, curium) deviennent prédominants. Ces derniers sont très peu mobiles en situation géologique. On peut sur la base de ces connaissances limiter à des valeurs très faibles le retour des corps de haute activité et à vie longue vers la biosphère.

Un développement soutenu de l'énergie nucléaire devra aussi couvrir l'utilisation de l'uranium ^{238}U, qui représente plus de 99 % des ressources. Ceci pourra se faire dans des réacteurs à neutrons rapides. Une filière thorium, fondée sur ^{232}Th, plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium, pourrait également être envisagée.

En dehors de la production d'électricité, l'énergie nucléaire pourrait produire de l'hydrogène pour répondre aux besoins du secteur des transports. Ceci est possible de façon indirecte par électrolyse de l'eau, grâce à de l'électricité produite sans utiliser de combustibles fossiles. Un autre domaine envisageable pour produire de l'hydrogène par voie thermochimique est celui des réacteurs à haute température (HTR) ■

3 EDF, Saint-Denis.
4 CEA, Saclay.
5 Directeur environnement, Institut français du pétrole.
6 European Institute for Energy Research, Karlsruhe, Allemagne, EDF R & D, Les Renardières, Moret/Loing.
7 CEA, Fontenay-aux-Roses.
8 EDF, Paris.



Certitudes et incertitudes de la prévision démographique



par **Henri Leridon** [1]

Naissance d'une préoccupation

L'idée d'élaborer des projections démographiques, c'est-à-dire de tenter de prédire l'évolution possible de la population d'un pays, est aussi ancienne que la démographie elle-même. On s'accorde à situer aux XVIIè et XVIIIè siècles les origines de la discipline, avec les ouvrages de John Graunt, de Johann-Peter Süsslmich et de Jean-Baptiste Moheau. De fait, c'est aussi à cette époque que l'on a commencé de s'interroger sur la dynamique des populations. Le débat a même fait rage entre certains grands esprits : Montesquieu ou Mirabeau, par exemple, considéraient que les populations d'Europe ne cessaient de décliner depuis la fin de l'Empire Romain ; Voltaire et bien d'autres n'en croyaient rien, et cherchaient plutôt à montrer que la population du Royaume de France était en expansion.

Si l'on n'était pas encore en mesure de réaliser de vraies projections, on cherchait déjà à estimer la population maximale qu'un pays, voire la planète entière, pourrait nourrir : dans son grand ouvrage (L'Ordre Divin), Süssmilch estime à 1 milliard la population mondiale vers 1760 et pense que 14 milliards d'habitants pourraient y vivre. Malthus devait proposer un siècle plus tard une vision bien plus pessimiste : pour lui, la croissance des ressources alimentaires ne pouvait pas suivre le rythme d'une croissance démographique même faible, mais continue.

Au 19éme siècle, des statisticiens comme Quételet ou Verhulst ont proposé des formes de « lois » d'évolution qui réconciliaient, d'une certaine façon, les divers points de vue : comme d'autres populations animales, les populations humaines seraient soumises à des lois « d'auto-freinage », la croissance créant elle-même le mécanisme conduisant à sa propre réduction. Les populations atteignent alors soit un état stationnaire (croissance nulle, effectif invariable), soit un régime cyclique (population stationnaire en moyenne). Il est d'ailleurs intéressant de constater qu'Alfred Lotka, considéré comme le fondateur de l'approche scientifique de la dynamique des populations, a commencé par s'intéresser à l'étude de l'équilibre des écosystèmes constitués de plusieurs populations animales…

Le débat sur la croissance a repris avec une grande vigueur dans les années 1960. A cette époque, en effet, on commençait de disposer de données fiables sur l'évolution de la population mondiale, et l'on observait une croissance continue non seulement de l'effectif de la population mondiale, mais aussi de son taux d'accroissement : l'évolution – en exponentielle d'exponentielle - était donc « explosive », et l'on n'a pas manqué de le souligner avec force (en parlant, par exemple, de « bombe P »). Du coup, on a réalisé que les grands problèmes de la planète, comme le développement durable, l'environnement ou l'effet de serre, étaient fortement liés à la variable « population », qu'on traite celle-ci de façon endogène ou exogène. Mais ce type d'analyse suppose de conduire des projections à long terme, sur un siècle ou davantage. Les projections démographiques sont-elles encore fiables à cet horizon ?

Comment procède-t-on ? L'idée de s'appuyer sur une « loi » d'évolution (du type logistique) a été abandonnée au début du siècle, faute de justifications empiriques convaincantes. On préfère utiliser une méthode plus raffinée sur le plan technique, qui respecte les contraintes internes de la dynamique démographique, et qui oblige à expliciter les hypothèses : la méthode des composantes.

1 Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche à l'INED.
2 United Nations, Long Range World Population Projections Based on the 1998 Revision, United Nations, New York, 2000.
3 D. H Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens III, The Limits to Growth, Universe Books, New York, 1972.

La méthode de projection

La méthode consiste à partir de la population initiale, répartie par sexe et âge, et à la faire évoluer année après année en appliquant, à chaque âge, des taux de mortalité, de fécondité et de migrations permettant de déterminer tous les effectifs un an plus tard. Il reste donc à imaginer les bonnes hypothèses pour les évolutions possibles de chacun de ces paramètres. Il faut aussi être conscient du « principe d'incertitude croissante » de la projection en fonction de sa durée. Au cours des premières années de la projection, les effectifs projetés dépendent essentiellement des hypothèses de mortalité (que l'on maîtrise assez bien) ; mais après 50 ans, c'est plus de la moitié de la population qui n'était pas encore présente au temps zéro (elle résulte des naissances postérieures à l'année initiale), et après 100 ans, la population s'est entièrement renouvelée. Or la fécondité que l'on va calculer pour cette année 100 résultera du comportement de femmes nées en moyenne 30 ans plus tôt, elles-mêmes filles de femmes nées 60 ans plus tôt, celles-ci ayant pour mères des femmes nées une dizaine d'années après le début de la projection… On comprend qu'il soit difficile de prévoir un effectif qui dépend du comportement de nos arrières petits enfants !

Il faut aussi savoir que les projections mondiales sont habituellement faites par agrégation des projections par pays. C'est ainsi que le scénario « fécondité constante » des Nations Unies, dans lequel on gèle les taux de fécondité observés dans chaque pays en 1998, conduit à une augmentation sensible de la fécondité mondiale dans les décennies suivantes : en moyenne mondiale, la fécondité passe de 2,8 à 3,9 enfants en 50 ans ! Il en est ainsi parce que le poids des pays à plus forte fécondité augmente au fil des années, précisément à cause de leur fécondité supérieure à celle des autres pays.

Le choix des hypothèses

On n'abordera pas ici le problème des migrations puisqu'au plan mondial le solde migratoire est toujours nul.

Pour prévoir l'évolution de la fécondité, on s'est longtemps appuyé sur le « schéma de la transition démographique ». L'idée est que, dans les régimes démographiques traditionnels, le taux de mortalité équilibre à peu près le taux de natalité, du moins en moyenne sur longue période. On sait, en effet, que la croissance démographique mondiale est restée très lente jusqu'au début du 20^{éme} siècle, hormis quelques courtes périodes d'accélération. Les progrès de l'hygiène et de la médecine font, à partir d'un certain moment, baisser la mortalité (temps T0 de la Figure 1). A natalité constante, le taux d'accroissement se met à augmenter, jusqu'à ce que la natalité (peut-être en réponse à cette forte poussée démographique) commence à son tour à décroître (temps T1). L'écart entre natalité et mortalité est maximum à une certaine date (T2), et on peut ensuite espérer un retour à l'équilibre en T3 avec des valeurs sensiblement réduites de la natalité et de la mortalité (qui ont pu passer, par exemple, de 40 p. 1000 à 10 p. 1 000). Pour la population mondiale, la date T2 de croissance maximale se situe vers 1960, avec un taux égal à 20 p. 1 000, et l'intervalle (T0 T2) a été de l'ordre de 50 ans.

L'évolution de la mortalité est presque systématiquement envisagée à la baisse (allongement de l'espérance de vie). On projette actuellement un gain de 0,25 année d'espérance de vie par an dans de nombreux pays ; en fait, des accidents sont toujours possibles, comme on vient de le voir en Russie et, plus gravement encore, dans certains pays d'Afrique à cause du sida : d'après les Nations Unies, les « pertes » d'espérance de vie, par rapport au niveau attendu, dépassent actuellement 10 ans dans quinze pays, 20 ans dans cinq pays, et 30 ans au Botswana.

Il est courant de proposer plusieurs scénarios d'évolution possible pour la fécondité. Le choix de ces scénarios consiste le plus souvent à définir d'abord une hypothèse « centrale » qui n'est pas forcément considérée comme la plus probable, mais comme celle qui illustre le mieux les tendances récentes, ou celle qui conduit à l'état stationnaire ; puis à encadrer cette hypothèse par des variantes « haute » et « basse » qui résultent du choix de valeurs plus élevées (ou plus faibles) pour la fécondité. L'inconvénient est que des écarts que l'on peut juger assez faibles au départ (entre 1,8 et 2,1 enfants par femme, par exemple), peuvent entraîner des écarts considérables après quelques décennies.

Quelques résultats

Voyons l'impact de ces diverses hypothèses sur les projections de la population mondiale, avec les dernières perspectives à long terme proposées par les Nations Unies [2] (figure 2). Dans l'hypothèse centrale, la fécondité tend partout vers le niveau de remplacement (2,05 enfants) : la population mondiale atteint alors 8,9 milliards en 2 050 (contre 6 actuellement) et se stabilise à 9,7 milliards en milieu de 22^{éme} siècle. L'hypothèse haute (fécondité stabilisée à 2,5-2,6) donne une valeur beaucoup plus élevée en 2 150 (24,8 milliards d'habitants), mais – au vu des évolutions antérieures – l'hypothèse apparaît très peu probable ; l'hypothèse intermédiaire (high-medium : 2,25 enfants), avec 16,2 milliards à la même date, est encore assez peu probable. A l'inverse, l'hypothèse basse (entre 1,4 et 1,6 enfant) ramènerait la population mondiale à moins de 5 milliards à partir de 2 100 (3,2 en 2 150) : on verra plus loin qu'il s'agirait-là d'un véritable scénario catastrophe. La projection intermédiaire (low-medium : 1,85 enfant) donnerait 5,3 milliards en 2150, ce qui est moins improbable, et un peu inférieur à la valeur actuelle (6 milliards).

On peut observer que les deux scénarios intermédiaires, qui conduisent à des populations égales respectivement à 16,2 et 5,3 milliards – dans un rapport de 3 à 1 – correspondent à des taux d'accroissement différant de moins d'un point : +0,4 % par an et – 0,3 % respectivement, en régime stabilisé. Les niveaux de fécondité sont également très proches dans les deux variantes : 2,25 et 1,85 enfants respectivement, contre 2,8 aujourd'hui.

Limites de ces projections

De nombreuses questions subsistent. Quelles sont les limites possibles à la longévité ? Dans les projections de long terme des Nations Unies, la durée de vie est plafonnée à 100 ans dans tous les pays. Est-ce trop, ou trop peu ? Les hypothèses de réduction de la mortalité dans les PED ne risquent-elles pas de s'avérer trop optimistes ? En dehors des désastres causés par l'épidémie de VIH-sida, ne peut-on craindre la réapparition de maladies supposées éradiquées ou l'émergence de formes nouvelles de maladies anciennes ? Et comment la fécondité va-t-elle évoluer ? La « fin de la transition » est-elle vraiment en vue dans tous les pays en développement ?

Et finalement, peut-on se contenter de traiter la variable population indépendamment d'autres grandes évolutions, comme la dégradation de l'environnement, l'épuisement possible de certaines ressources naturelles, les limites éventuelles aux progrès de la productivité en agriculture… ? La seule tentative dans ce sens, à ma connaissance, reste le modèle développé au MIT pour le Club de Rome au début des années 1970 [3]. Dans tous les scénarios d'évolution « spontanée », la population mondiale atteignait un maximum vers 2030-2050 (12 milliards dans le « modèle standard »), pour décroître ensuite assez fortement (retour à 6 milliards en 50 ans dans ce même modèle). L'un des scénarios envisageait un « frein par la pollution », le développement économique se faisant trop vite et sans protections environnementales suffisantes. La population mondiale atteignait alors 10 milliards vers 2040, et retombait à 3,5 milliards en 2070… Cette chute brutale résultait de l'hypothèse que l'espérance de vie serait rapidement divisée par deux du fait de la pollution. On voit que ce scénario, qui prédisait assez correctement l'évolution de la population jusqu'en 2050 tourne ensuite à la catastrophe, sur la base d'hypothèses qui paraissent aujourd'hui peu réalistes.

En conclusion, on peut dire que les démographes prévoient avec une bonne certitude ce qui est déjà inscrit dans la pyramide des âges, à 15-20 ans, mais beaucoup plus difficilement au-delà ■

Figure 1 : Schéma de la transition démographique.

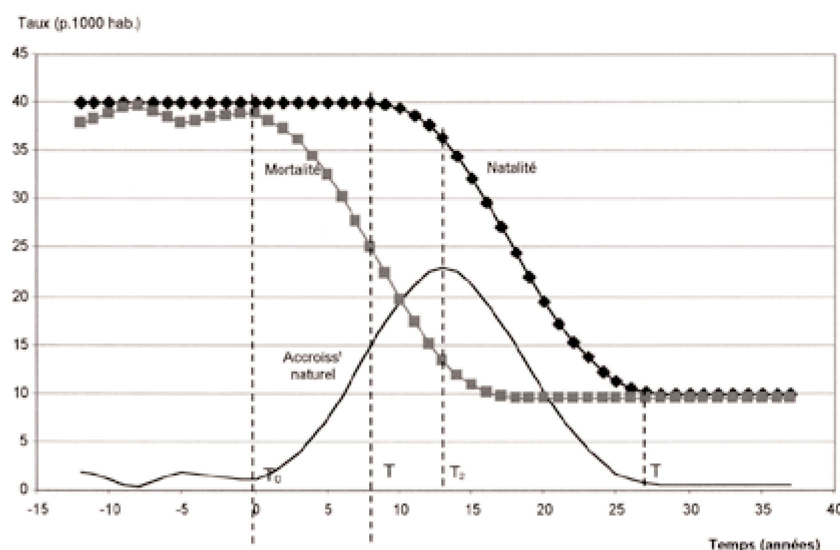
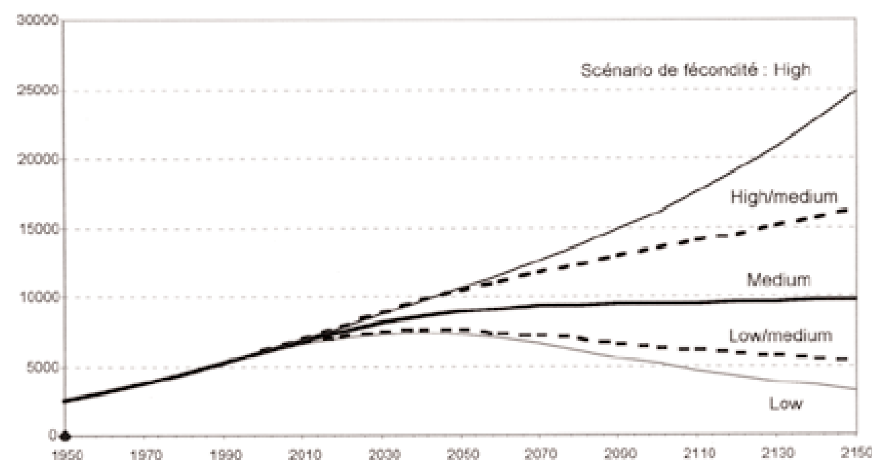


Figure 2 : Population mondiale, 1950-2150 : Variantes des projections des Nations Unies (base 1998).



La régénération du myocarde par les cellules souches

Par **Philippe Menasché**[1]

Cent-vingt mille nouveaux cas par an en France, 1 à 2 % du budget de la santé des pays industrialisés : ces deux chiffres disent avec éloquence l'importance du problème médico-économique que pose l'insuffisance cardiaque dont la communauté cardiologique s'accorde à dire qu'elle représente le défi thérapeutique majeur du siècle qui commence.

Certes, des avancées majeures ont été accomplies au cours des dernières décennies, principalement fondées sur les drogues (béta-bloquants et inhibiteurs de l'enzyme de conversion avant tout) et, plus récemment, la resynchronisation ventriculaire par stimulation multisite. Néanmoins, il persiste des formes graves, réfractaires à ces mesures et conduisant à envisager des approches plus agressives que l'on peut ranger dans trois grandes catégories selon qu'elles visent à remplacer le cœur, en totalité (transplantation cardiaque) ou partiellement (implantation d'un dispositif d'assistance circulatoire), à le remodeler (exclusion des zones infarcies et mise en place d'un patch visant à normaliser la géométrie ventriculaire gauche) ou à le régénérer. C'est cette dernière stratégie qui sera discutée ici.

Le principe de cette thérapie à visée régénératrice est aujourd'hui bien établi : recoloniser des zones de myocarde ayant évolué vers une cicatrice fibreuse à la suite d'un infarctus à l'aide de nouvelles cellules contractiles susceptibles d'y restaurer une fonctionnalité. La capacité proliférative des cardiomyocytes résiduels étant trop faible pour avoir un effet compensateur (du moins en l'absence de signaux peut-être susceptibles d'accélérer ce processus), force est de recourir à un apport exogène de cellules dont on sait qu'elles doivent posséder des propriétés contractiles. Dans l'immédiat, le choix se limite donc aux myoblastes squelettiques et aux cellules de la moelle susceptibles d'une transdifférenciation. Dans les deux cas, en effet, l'origine autologue du greffon simplifie les problèmes liés au prélèvement tout en supprimant les obstacles d'ordre éthique ou immunologique associés aux cellules cardiaques fœtales.

1 Département de Chirurgie cardio-vasculaire, Hôpital européen Georges Pompidou et INSERM U572, Hôpital Lariboisière, Paris.

Myoblastes squelettiques

Stricto sensu, les myoblastes squelettiques, qu'on peut considérer comme les cellules souches du muscle, ne permettent pas une véritable régénération myocardique dans la mesure où, une fois implantées dans le tissu cicatriciel de l'infarctus, elles ne se différencient qu'en myotubes qui n'expriment aucun marqueur cardio-spécifique et notamment aucune des protéines de jonction intercellulaire (N-cadhérine et connexine 43) impliquées dans le couplage électromécanique. Seule, l'apparition de fibres co-exprimant des myosines rapides et lentes (phénotype quasiment absent du muscle périphérique *in situ*), suggère une certaine adaptation à l'environnement. Le fait qu'il n'y ait pas transdifférenciation des myoblastes vers un phénotype de type cardiaque n'empêche toutefois nullement ce type de greffe d'entraîner une amélioration de la fonction à la fois régionale et globale, constatée sur divers modèles d'infarctus du myocarde chez le petit et le gros animal et qui semble se maintenir dans le temps. Le mécanisme de cette amélioration reste encore largement ignoré et trois hypothèses, qui ne sont pas mutuellement exclusives, peuvent être avancées. La première fait jouer aux îlots de cellules greffées un rôle de contention permettant une limitation de la dilatation ventriculaire. Toutefois, autant ce mécanisme est plausible si les injections sont faites tôt après l'infarctus, autant il devient difficile d'imaginer que les greffons musculaires peuvent faire diminuer les dimensions ventriculaires dès lors que le processus de remodelage est déjà évolué. La seconde hypothèse implique une contraction active des myoblastes greffés. Encore faut-il pour que ces contractions contribuent à l'amélioration globale de la fonction qu'il y ait couplage entre les myoblastes et les cellules cardiaques du receveur. Un couplage par les jonctions communicantes classiques semblant exclu, force est d'imaginer d'autres mécanismes de communications intercellulaire, par exemple un effet de champ électrique, au demeurant suggéré par nos observations électrophysiologiques qu'un fort courant dépolarisant peut déclencher un potentiel d'action dans les myoblastes greffés, suivi d'une contraction. Cette mise en évidence que les cellules greffées ont conservé leurs propriétés excitables et contractiles, et sont par conséquent vivantes, conduit à évoquer une troisième hypothèse faisant appel à des effets paracrines. Les myoblastes pourraient en effet se comporter comme des plate-formes relarguant différents facteurs de croissance qui optimiseraient la fonction des cardiomyocytes résiduels et/ou recruteraient les cellules souches cardiaques récemment identifiées, contribuant ainsi à augmenter le pool endogène d'éléments contractiles. Les facteurs d'origine myogènique responsables de ces effets paracrines restent à identifier mais il n'est pas sans intérêt de noter que nous avons récemment observé que les myoblastes de différentes espèces (dont l'homme) produisaient l'insulin growth factor (IGF)-1 dont on connaît le rôle sur la régénération tissulaire et les effets cardioprotecteurs qui y sont associés. Il est également intéressant que ce mécanisme paracrine semble expliquer les effets bénéfiques de la greffe de cellules cérébrales chez les parkinsoniens (sécrétion de dopamine) ou d'îlots de Langerhans chez les diabétiques (sécrétion d'insuline).

En dépit des incertitudes qui persistent, la transplantation de myoblastes visant à améliorer l'insuffisance cardiaque est désormais entrée dans le pratique clinique, du moins au stade de l'investigation préliminaire. Entre juin 2000 et novembre 2001, nous avons en effet mené un essai de phase I chez 10 patients satisfaisant aux critères d'inclusion suivants : une dysfonction ventriculaire gauche majeure (fraction d'éjection inférieure ou égale à 35 %), une cicatrice définie d'infarctus, akinétique à l'échographie et non viable métaboliquement sur la tomographie d'émission de positons, et enfin une indication de pontage coronaire dans des territoires différents de celui où les cellules étaient implantées. Les deux autres études très similaires conduites depuis en Europe et aux USA portent à environ 40 le nombre de patients ayant aujourd'hui reçu cette thérapie cellulaire. Ces premiers essais ont d'abord permis de confirmer la faisabilité de la technique. Nous avons également pu vérifier la bonne tolérance à ces injections intramyocardiques multiples qui n'ont été compliquées d'aucun problème technique. Le seul effet indésirable vraisemblable de l'implantation des myoblastes est la survenue, chez certains patients, de tachycardies ventriculaires soutenues, en général précoces et peu récidivantes. Ces évènements rythmiques - dont on ne saurait oublier qu'ils font partie de l'histoire naturelle de la maladie causale – peuvent être contrôlés pharmacologiquement ou par l'implantation d'un défibrillateur automatique dont les bénéfices en termes de survie ont par ailleurs été bien documentés chez ce type de patients. Quant à l'efficacité de la technique, elle ne peut à ce jour être évaluée qu'avec prudence compte tenu des multiples problèmes méthodologiques (petit nombre de patients inclus, absence de groupes contrôles et rôle confondant du pontage, même si celui-ci n'est pas fait dans la zone transplantée). Toutefois, le fait que, dans notre expérience, 60 % des segments infarcis initialement akinétiques et non viables présentent, après la greffe de myoblastes, un épaississement systolique, peut être considéré comme encourageant puisque les données de la littérature suggèrent qu'après pontage seul, 10 % au maximum des segments satisfaisant à ces critères auraient pu s'améliorer.

Cellules de la moelle

Les cellules médullaires bénéficient actuellement d'un engouement qu'explique l'attractivité du concept (plasticité susceptible de permettre une transdifférenciation en cellules cardiaques et/ou vasculaires en réponse à des signaux appropriés) mais que ne justifient pas nécessairement des résultats expérimentaux souvent discordants.

Schématiquement, deux approches principales peuvent être considérées. La première consiste à utiliser la moelle totale, c'est à dire, en pratique des cellules mononucléées obtenues par centrifugation d'un prélèvement médullaire ou sanguin et immédiatement réinjectées, sans période de culture. Cette stratégie a pour avantage majeur sa simplicité. Elle est, de surcroît, justifiée par notre ignorance quant au type cellulaire le mieux adapté pour induire angiogenèse et myogenèse et donc le souci de ne pas trier les populations cellulaires au risque d'exclure une fraction active. Si certaines études expérimentales suggèrent que les signaux émis par un tissu fraîchement infarci peuvent attirer des cellules injectées par voie systémique dans la zone lésée, les applications cliniques ont plutôt privilégié une administration directement intracardiaque. C'est ainsi que plusieurs patients ont déjà reçu leurs propres cellules mononucléées par voie intra-coronaire, au stade aigu de l'infarctus du myocarde. Les résultats permettent seulement de conclure à la bonne tolérance de ces injections. L'enthousiasme de certains investigateurs quant à l'efficacité de cette approche (amélioration de la perfusion et de la fonction) doit, en effet, être nuancée à la lumière des biais méthodologiques qui obèrent sérieuse-

ment ces essais, notamment la revascularisation concomitante par angioplastie du territoire greffé et la comparaison des résultats avec des groupes contrôles « historiques », faute, malheureusement, de toute randomisation.

La seconde approche consiste à utiliser sélectivement des populations phénotypiquement bien définies de cellules souches, hématopoïétiques ou stromales. Il y a une logique certaine à utiliser des progéniteurs communs aux lignées hématopoïétiques et endothéliales et donc susceptibles, en présence des signaux appropriés, d'orienter leur différenciation vers la voie de l'angiogenèse. Il est, possible que ces cellules agissent davantage par le biais d'une libération de facteurs de croissance angiogèniques que par une véritable incorporation anatomique dans les vaisseaux néoformés. Quant aux cellules souches stromales, leur différenciation cardiomyogénique requiert soit un prétraitement par des agents déméthylants tels la 5-azacytidine soit des co-cultures en présence de cellules cardiaques, toutes conditions dont on voit aisément les difficultés d'application clinique. C'est la raison pour laquelle un grand espoir a été récemment apporté par l'isolement d'un contingent numériquement très faible de cellules souches stromales adultes (baptisées MAPCs pour mesenchymatous adult pluripotent cells) qui seraient douées d'une véritable pluripotentialité. A ce jour, cependant, les résultats rapportés par le groupe de Catherine Verfaillie qui a décrit cette population n'ont pu être reproduits dans d'autres laboratoires et s'il semble établi que ces cellules peuvent donner naissance aux tissus issus des trois lignées primitives (ecto-, endo- et mésodermiques), leur transformation en véritables cardiomyocytes n'a pas été mise en évidence. Les espoirs suscités par l'utilisation thérapeutique de cette sous-population en cardiologie sont donc encore loin d'être validés.

Perspectives

La reconnaissance de la transplantation cellulaire comme moyen thérapeutique efficace de régénération myocardique exige que soient résolus de nombreux problèmes. Trois ont une importance particulière.

Le premier problème est celui de la mort cellulaire qui est considérable, jusqu'à 90 % des cellules injectées au cours des premières heures qui suivent la transplantation. Plusieurs facteurs sont ici impliqués : contraintes physiques exercées sur les cellules pendant les injections, réponse inflammatoire aux multiples microtraumatismes tissulaires locaux induits par les piqûres d'aiguille, conditions hypoxiques de l'environnement et apoptose des cellules greffées. Aussi est-il essentiel de développer des stratégies permettant d'améliorer la survie des cellules transplantées et par conséquent d'optimiser les bénéfices fonctionnels de l'intervention. Parmi ces stratégies, l'induction d'une angiogenèse (par transfection des myoblastes ou co-administration de facteurs de croissance angiogèniques) afin de limiter la composante ischémique de la mort cellulaire, et la limitation de l'apoptose apparaissent les plus prometteuses.

Le second problème est de réduire le caractère invasif du transfert cellulaire. A cet effet, différentes approches par cathétérisme percutané (voie endo-ventriculaire gauche, voie intra-coronaire artérielle ou veineuse) sont actuellement évaluées comme alternatives à l'approche épicardique chirurgicale.

Le troisième problème majeur est naturellement celui du choix de la cellule optimale. Dans l'état actuel des connaissances, on serait tenté de ne pas opposer myoblastes squelettiques et cellules médullaires mais de les considérer plutôt comme s'adressant à des populations différentes, les premières visant à améliorer la fonction des insuffisants cardiaques, les secondes, à augmenter l'angiogenèse chez des patients ischémiques échappant aux techniques traditionnelles de revascularisation. La disponibilité actuelle de ces deux types cellulaires ne doit pas faire sous-estimer l'importance d'explorer d'autres pistes, et notamment celle des cellules souches embryonnaires qui, si leur différenciation vers une lignée cardiomyocytaire pure était maîtrisée, pourraient représenter la lignée cellulaire la mieux adaptée à une bonne intégration fonctionnelle dans le myocarde-hôte. La solution du problème d'incompatibilité immunologique passe naturellement par le transfert nucléaire à partir d'une cellule somatique du futur receveur. Un débat apaisé serait, en la matière, bien utile.

Dans l'intervalle, il est essentiel d'évaluer au mieux les cellules souches adultes autologues, myogèniques ou médullaires, aujourd'hui disponibles. Une évaluation menée selon des règles rigoureuses permettra seule de savoir dans quelques années si les espoirs aujourd'hui fondés sur la thérapie cellulaire sont fondés et dans quelle mesure cette approche permet une régénération myocardique se traduisant par une amélioration réelle de la survie et de l'état fonctionnel des patients atteints d'insuffisance cardiaque sévère ■

Le magnétisme terrestre




Par **Jean-Paul Poirier**[1] et **Jean-Louis Le Mouël**[2]

Gauss, vers 1840, montra que la partie principale du champ magnétique que l'on mesure à la surface de la Terre est d'origine interne. Le champ principal peut être décomposé en un champ dipôle et un champ non-dipôle, dont l'intensité est de l'ordre de 10 % du champ total.

Le champ magnétique varie à différentes échelles de temps. Les réseaux d'observatoires magnétiques, maintenant, pour la plupart, fédérés internationalement (Intermagnet) permettent de mesurer avec précision la variation séculaire du champ principal, à l'échelle de l'année.

A l'échelle des temps géologiques, le champ dipôle s'inverse, peut-être de façon chaotique, à des moments aléatoires, avec des intervalles allant de la dizaine de milliers à la centaine de millions d'années. On connaît la chronologie des inversions depuis environ 170 millions d'années.

L'origine du champ magnétique terrestre a longtemps été un des grands problèmes de la physique. On pense, depuis une cinquantaine d'années, qu'il résulte de l'opération de la « géodynamo », dynamo fluide auto-entretenue dans le noyau de fer liquide de la Terre (entre 1900 et 5 150 km de profondeur). Le fluide métallique du noyau, conducteur de l'électricité, est animé de mouvements de convection et le mouvement du fluide dans un champ magnétique induit un courant électrique qui, à son tour, crée un champ magnétique renforçant le champ initial. L'étude de la variation séculaire permet d'accéder à une estimation de la géométrie et de la vitesse des courants fluides à la surface du noyau (de l'ordre du mètre par heure). Un moteur possible de la convection est le dégagement de chaleur latente lors de la cristallisation de la graine de fer, d'environ 1 300 km de rayon, au centre de la Terre. L'énergie gravitationnelle libérée par les courants de fluide ascendant chaud et de fluide descendant refroidi peut être tranformée en énergie magnétique. Cependant, le rendement de ce processus est probablement insuffisant pour entretenir la dynamo, et l'on doit plutôt recourir à la convection solutale, dont le moteur est la force d'Archimède liée au dégagement d'éléments légers (S, Si, O… ?), contenus en faible proportion dans le noyau fluide et exclus de la graine lors de la cristallisation de celle-ci.

Les bilans énergétiques laissent à penser que l'âge de la graine n'est guère supérieur au milliard d'années. Or, l'aimantation de roches très anciennes montre que le champ magnétique existait déjà il y a 3,5 milliards d'années, alors que la convection solutale ne pouvait exister, en l'absence de graine. Il faut donc que le champ ait alors été entretenu par convection thermique…ou par un autre processus.

Le rôle de la graine est également important, en raison du fait que les courants de convection pourraient être, en partie, organisés en colonnes parallèles à l'axe de rotation, dans la partie du noyau extérieure au cylindre tangent à la graine.

La modélisation théorique du champ magnétique terrestre est un difficile problème de magnétohydrodynamique. Il faut en effet coupler des équations aux dérivées partielles non linéaires : équations de Maxwell de l'électromagnétisme et équation de Navier-Stokes de l'hydrodynamique, tenant compte de la rotation de la Terre (force de Coriolis) et des forces de Lorenz. Des modèles numériques utilisant de puissants ordinateurs ont récemment permis de simuler des dynamos, dont certaines exhibent des traits caractéristiques de la géodynamo, comme la faculté de s'inverser spontanément. On a aussi proposé des modèles abstraits utilisant les techniques de transfert d'échelle. Toutefois, la cause physique des inversions est encore mal comprise ; il se pourrait qu'un événement thermique à la base du manteau perturbe les courants de convection et produise une instabilité conduisant à un inversion.

Une autre approche consiste à réaliser des dynamos expérimentales, en utilisant du sodium liquide. Bien que souvent assez éloignées des conditions terrestres, ces expériences dont certaines commencent à porter fruit, peuvent conduire à une meilleure compréhension du fonctionnement des dynamos fluides et de la géodynamo ■

1 Membre de l'Académie des sciences, physicien à l'institut de physique du globe de Paris.
2 Membre de l'Académie des sciences, physicien à l'institut de physique du globe de Paris.

TFIIH de la transcription à la clinique

Par **Jean-Marc Egly**[1]

Nous nous intéressons depuis plusieurs années aux mécanismes de régulation de l'expression des gènes, et plus particulièrement de ceux codant pour les protéines. Ce projet était conforté par l'engouement pour les réactions entre les molécules biologiques, que m'avaient apporté les cours de chimie organique ainsi qu'un stage post-doctoral dans le laboratoire du Professeur J. Porath en Suède, où je me suis familiarisé avec la notion d'interaction entre molécules au travers des techniques de chromatographie. Ces quelques acquis en main, j'ai eu le courage, ou l'inconscience pour l'époque, d'accepter de travailler avec Pierre Chambon sur un sujet hautement compétitif qui lui tenait à cœur : les mécanismes de régulation de la transcription, projet qu'il avait déjà amené avec ses étudiants pionniers à un certain niveau de connaissance si ce n'est d'excellence. Grâce à son soutien et malgré les commentaires de certains de nos juges-chercheurs, pour lesquels nous avions obligation de résultats quasi immédiate, nous avons réussi, en utilisant différentes techniques, à identifier, purifier et cloner l'un des facteurs clé du mécanisme transcriptionnel, le facteur TBP (TATA binding factor). Ce facteur dénommé ainsi car reconnaissant spécifiquement une séquence promotrice TATA permettait la synthèse d'ARN non seulement des gènes codant pour les protéines mais également de ceux lus par les ARN polymérases I et III. Il a depuis été également montré sa participation à divers mécanismes cellulaires au travers de ses facteurs associés : les TAFs (pour TBP associated factors). A ce jour, c'est certainement l'une des protéines qui fait l'objet du plus grand nombre de publications en biologie moléculaire.

Ces sept années de recherches, entremêlées d'euphorie et de déprimes, nous ont appris en plus de précieuses informations sur la transcription, la patience et la réflexion. Il fallait reconstituer *in vitro* le mécanisme de synthèse de l'ARN, observé *in vivo*, et pour se faire il fallait identifier et purifier tous les partenaires protéiques (facteurs et ARN polymérase II) dont certains avaient fait l'objet de travaux de certains de nos collègues. Nous avons du également optimiser le système de synthèse de l'ARN *in vitro* à partir de quantités minimes de ces facteurs. Ce fut fait ainsi que l'apparition de nouveaux acteurs dans le domaine. Cette thématique devenue très compétitive attirait de nombreux adeptes. L'agoraphobie ou la curiosité, c'est selon, nous a conduit à dévier de notre route et nous intéresser à une autre fraction protéique dont l'absolue nécessité dans des tests de transcription avaient été démontrée et qui contenait un autre facteur de transcription, TFIIH.

L'identification de TFIIH : Cette aventure a en fait commencé en 1989 lorsque avec deux étudiants : Laurent Fischer et Matthieu Gérard, nous avons réussi à purifier un complexe protéique appelé dans un premier temps BTF2, nécessaire à la synthèse d'ARN *in vitro*. Il fallut plus de deux ans et demi, quelques 500 litres de cellules HeLa et sept étapes de purification effectuées en chambre froide, pour obtenir ce complexe constitué de neuf sous-unités et baptisé à présent TFIIH. Pour parvenir à nos fins, il a fallu mettre en place un système synchronisé de croissance cellulaire en bioréacteurs permettant de produire de façon hebdomadaire quelques 200 litres de cellules. Les étudiants, réels maîtres d'œuvres d'une telle organisation, géraient la succession des différentes étapes de purifications entrecoupées de dialyses, de centrifugations, de tests biochimiques, dans cette véritable course contre le temps et la dégradation du matériel.

La purification de ce complexe multiprotéique aurait pu nous conduire par la suite à un travail classique voire routinier de biochimie visant à caractériser systématiquement les divers composants peptidiques de ce facteur. Cependant, l'identification dans cette fraction protéique du produit d'un gène XPB, dont le produit avait été défini comme un facteur impliqué dans des mécanismes de réparation par excision de nucléotides (NER), nous plongea dans un scepticisme certain. Cette thématique était en fait fort éloignée de nos préoccupations premières. Étonnement et dépit de Laurent Schaeffer en charge du projet, qui suspectait à priori l'artefact, un anticorps dirigé contre XPB nous a confirmé que cette protéine appartenait à TFIIH, ce facteur dont nous avons par la suite montré qu'il s'avérait être indispensable à la transcription et la réparation de l'ADN *in vitro*. La microinjection de ce facteur hautement purifié dans des cellules de malades atteints du xeroderma pigmentosum, défini comme une maladie de la réparation et dont le gène XPB était muté, restaurait la réparation de l'ADN lésé et une transcription optimale. Ces travaux réalisés en étroite collaboration avec le groupe de Jan Hoeijmakers à Rotterdam, mettaient en évidence le lien étroit entre la transcription et la réparation de l'ADN, deux mécanismes d'importance pour la vie de la cellule. Ces travaux parurent dans le magazine Science qui en a fait sa couverture, avec comme en tête « DNA repair, molecule of the year ».

Plongée involontairement dans deux mondes inconnus de nous, celui de la réparation et celui des maladies génétiques, l'équipe que je dirigeais a poursuivi cette aventure avec comme devise à chacun sa sous-unité. Nous avons alors avec Vincent Moncollin, Sandrine Humbert, Jorg Adamzewski, Jean Christophe Marinoni, Christophe Perez, caractérisé les neufs sous-unités de TFIIH, ajoutant à notre liste XPD, une seconde hélicase également impliquée dans la réparation de l'ADN et qui lorsque mutée est responsable d'une autre forme de xeroderma, celui du groupe D. L'enthousiasme qui nous gagnait, ne pouvait décroître suite à la mise en évidence par Richard Roy de cdk7, une kinase dépendante d'une cycline comme appartenant à ce complexe. Nous montrions ainsi combien ce facteur est un composant essentiel de la vie cellulaire car impliqué également dans le déroulement du cycle cellulaire, en plus de sa participation aux mécanismes fondamentaux que sont la transcription et la réparation, au travers de ses trois activités enzymatiques.

Ayant identifié les dernières sous-unités de TFIIH suite aux travaux réalisés avec Mireille Rossignol sur le complexe CAK, nous nous engagions alors dans leur caractérisation sachant qu'il possédait plusieurs activités enzymatiques dont l'orchestration devait aboutir à la synthèse en due forme de molécules d'ARN, ou à l'élimination de lésions engendrées par quelques agents génotoxiques sur l'ADN. Il était alors difficile de poursuivre sans avoir au préalable résolu problème de la disponibilité du matériel en quantité suffisante. Des fibroblastes prélevés chez divers patients ayant une mutation dans l'une ou l'autre des sous-unités de TFIIH, difficiles à mettre en culture, ne pouvaient représenter une source de matière première suffisante pour purifier TFIIH par des techniques conventionnelles. Pour pallier à ce manque, avec Frank Tirode, nous avons pu en utilisant le système baculovirus/cellules d'insectes, reconstituer et produire le complexe recombinant TFIIH avec ses neuf sous-unités, un exploit technologique qui allait nous permettre de produire toute une série de facteurs portant les mutations trouvées chez les

1 Lauréat du Prix AGF Athéna-Institut de France 2002, Professeur à l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire, Illkirch.

malades XPB et XPD, et ainsi être en mesure de fournir quelques explications quant à leur phénotype. Nous allions ainsi et ce grâce à la micro-immunopurification mise au point par Frédéric Coin, pouvoir disséquer le rôle de chacune des sous-unités de TFIIH.

XPB, l'hélicase de la transcription : L'initiation de la synthèse de l'ARN nécessite une fois le promoteur reconnu par la série de facteurs de classe II et l'ARN polymérase, l'ouverture de l'ADN pour permettre à cette dernière la lecture du brin codant. Nous avons alors montré que cette fonction est remplie par XPB qui sera ainsi défini comme étant l'hélicase de la transcription. XPB participera également à l'élimination des lésions de l'ADN. On peut apprécier l'importance de préserver cette fonction d'ouverture, condition d'une bonne expression des protéines.

XPD, ouverture et ancrage : Cette deuxième hélicase de TFIIH ne semble pas encore avoir révélé la plénitude de son rôle. D'une part nous avons montré qu'elle était moins nécessaire à la réaction de transcription qu'à celle de la réparation. En outre et cela est d'importance, elle permet l'ancrage du complexe CAK à TFIIH par l'intermédiaire de la sous-unité p44 qui régule aussi l'activité hélicase de XPD, permettant l'ouverture de l'ADN autour de la lésion et ensuite l'excision et l'élimination du brin endommagé. On montrait alors les secrets de cette protéine dont l'étude structure-fonction fut abordée par Thierry Serroz, Alexandre Temeaux-Bravard et le groupe de Dino Moras.

Cdk7 un régulateur de la réponse hormonale : De nombreux facteurs de transcription sont modifiés et donc régulés suite à une phosphorylation, une déphosphorylation, une acétylation, une sumoylation, … Dans ce contexte, le mode de régulation par phosphorylation, est pris en compte par TFIIH au travers de son complexe kinasique. Ainsi CAK utilise comme substrat diverses kinases dépendantes des cyclines lui faisant jouer un rôle dans la cascade des évènements qui martèlent le cycle cellulaire. Il phosphoryle aussi divers composants de la transcription tels que l'ARN polymérase II et les récepteurs nucléaires, faisant de TFIIH en plus de son rôle premier, un facteur de régulation et aussi un acteur essentiel de la réponse hormonale. Ces résultats furent obtenus suite à l'observation d'une part, du rôle essentiel de l'interaction entre XPD et p44 mis en évidence par Frédéric Coin et Jean Christophe Marinoni dans l'architecture de TFIIH, et d'autre part, de l'utilisation par cdk7 de récepteurs nucléaires comme substrats (travaux réalisés en collaboration avec le groupe de Cécile Rochette-Egly). Fort de ces précieuses informations, avec Anne Keriel nous avons montré comment TFIIH pouvait conditionner l'expression de gènes sous la dominance de récepteurs nucléaires, contribuant ainsi à la compréhension des mécanismes de régulation hormonale.

TFIIH et les syndromes de transcription : Des mutations dans les sous-unités XPB et XPD de TFIIH sont à l'origine du xeroderma pigmentosum (XP). Cette maladie se traduit chez le patient par une photosensibilité, avec une hyperpigmentation cutanée pouvant être à l'origine de nombreux cancers de la peau, ainsi qu'une neurodégénérescence et un retard mental. Dans de nombreux cas, XP peut être associé soit au syndrome de Cockayne caractérisé par une déficience dans le système de transcription couplé à la réparation, soit à la trichothiodystrophie dont le phénotype le plus typique est des cheveux et des phanères cassants. Grâce aux différentes techniques en notre possession que ce soit la transcription ou la réparation de l'ADN mise au point avec Jérôme Auriol, et fort de l'appui de notre complice Jan Hoeijmakers avec lequel nous collaborons depuis plus de dix ans ainsi que de celui d'Alain Sarasin (Villejuif), Miria Stefanini (Pavie) et Claude Kédinger (Strasbourg), ainsi que diverses données cliniques, nous avons pu non seulement fournir un début d'explication aux divers phénotypes observés chez les malades, mais surtout mieux comprendre les mécanismes de transcription et réparation.

- Les mutations identifiées sur les quelques patients XPB affectent la fonction d'ouverture de TFIIH. En effet XPB étant l'hélicase de la transcription, une ouverture non optimale du promoteur empêchera la lecture du gène en question. Ceci se traduira en premier lieu par une baisse de la synthèse d'ARN, pouvant expliquer le peu de malades existants et la sévérité du phénotype.
- Les mutations dans l'extrémité C-terminale de XPD observées dans plus de 70 % des cas, inhibent son interaction avec la sous-unité régulatrice p44. Il en ressort que l'activité XPD hélicase ne pouvant être stimulée, la réparation des brins de l'ADN endommagés se fera difficilement ; nous observerons alors une photosensibilité accrue chez les patients, aboutissant dans de nombreux cas à des cancers de la peau. Les défauts de croissance, les problèmes de malformation du squelette ou la dysmyelination trouveront leur origine dans la faiblesse de la réponse hormonale, car dans ce cas les récepteurs nucléaires ne pourront être stimulés.
- Le phénotype biochimique de la forme A de la trichothiodystrophie (TTD) est du à de sous-concentrations cellulaires de TFIIH comme nous avons pu le constater par des expériences en immunofluorescence. La faible concentration de TFIIH, montrée chez les malades TTD-A que nous avons mis en évidence avec Etienne Bergmannn et Wim Vermeulen (Rotterdam) peut trouver son explication dans une non stabilité de ce facteur ou un défaut au niveau de la traduction.

En conclusion, l'ensemble de ces travaux a permis de montrer le lien qui existe entre expression des gènes (transcription) et conservation de l'intégrité du génome (réparation de l'ADN). En étudiant finement les activités du facteur TFIIH, nous avons pu non seulement expliquer certains phénotypes des malades XP ou TTD, mais surtout de décortiquer et de décrire certaines des étapes du mécanisme de transcription et de réparation de l'ADN ■

De la transgenèse animale à la biothérapie chez l'homme[1]

Par **Jean-Yves Chapron**[2]

Cet ouvrage s'inscrit dans la continuité du rapport RST n° 13 (Les plantes génétiquement modifiées), publié en décembre 2002. En effet, dans le cadre de la mission qui lui a été confiée le 15 juillet 1998 par le Comité interministériel de la recherche scientifique et technique, l'Académie a décidé de réfléchir sur la portée des avancées récentes de la recherche biologique fondamentale et des biotechnologies. Il fallait donc que le volet consacré au monde végétal fût complété par une étude dévolue au monde animal et à l'homme.

Les connaissances acquises depuis cinquante ans sur les mécanismes biologiques qui gouvernent le développement des organismes permettent l'élaboration de nouvelles stratégies diagnostiques et thérapeutiques — biothérapies, médecine dite « régénérative » — que cet ouvrage de synthèse et de proposition s'attache à décrire.

À partir des études menées sur la souris génétiquement modifiée, des horizons extraordinaires ont été ouverts pour la compréhension de la biologie du développement, de la physiologie, de la physiopathologie et pour l'étude des maladies humaines.

La naissance de la brebis Dolly a provoqué une vaste discussion sur le clonage animal et ses éventuelles projections vers l'homme. Ce rapport décrit nos connaissances dans ce domaine et souligne l'intérêt d'avancer dans la voie du transfert de noyaux somatiques dans des ovocytes humains à des fins thérapeutiques. En revanche, l'Académie souligne que l'interdiction universelle du clonage humain à visée reproductive doit absolument être instaurée.

La transplantation d'organes fait partie du quotidien mais l'utilisation d'organes ou de cellules prélevés sur des animaux, comme ressources potentielles pour la xénotransplantation chez l'homme, peut pallier les limites actuelles de la transplantation d'origine humaine. Cette piste de recherche fait l'objet d'un chapitre.

Les connaissances sur les anomalies génétiques liées aux maladies nous amènent à considérer les possibilités de corriger ces mutations par la thérapie génique ou cellulaire, y compris par l'utilisation de cellules d'origine animale. Dans cette voie difficile, le groupe de travail rappelle qu'une démarche scientifique très rigoureuse est également nécessaire.

De même, les récentes démonstrations de la capacité de différenciation de cellules souches renforcent l'intérêt d'approfondir leur étude chez l'homme. Les aspects légaux des manipulations de cellules souches sont décrits, avec une ouverture sur les diverses approches sociopolitiques, la nature des débats et les dispositifs réglementaires dans différents pays.

Enfin, un chapitre est consacré aux protéines-médicaments, qui prennent une place importante dans l'arsenal thérapeutique récent : ces médicaments sont aujourd'hui fabriqués par recours à des organismes génétiquement modifiés — bactéries, levures ou cellules animales cultivées dans un milieu confiné.

L'ouvrage présente des recommandations qui prennent en compte les enjeux et risques réels liés à l'ensemble de ces avancées.

Il est évident que la médecine régénérative est un processus coûteux qui ne pourra être appliqué, dans un premier temps, qu'à un nombre restreint de sujets. Néanmoins, il est à prévoir que chaque approche médicale novatrice deviendra peu à peu plus routinière, plus fiable et susceptible d'applications au bénéfice de tous. ■

1 RST 14, février 2003, Éditions Tec & Doc, 14, rue de Provigny 94 236 Cachan Cedex, http : www.Lavoisier.fr

1 Chargé de mission à l'Académie des sciences.

René Thom

Ancien élève de l'École Normale Supérieure, le mathématicien René Thom, troisième français à avoir obtenu la prestigieuse médaille Fields, a apporté une contribution majeure dans plusieurs domaines mathématiques, en particulier la topologie différentielle. Mathématicien mais aussi philosophe, René Thom s'est également consacré aux applications de la topologie aux phénomènes de la vie, notamment par sa théorie des "catastrophes".

René Thom, né en 1923, est l'un des fondateurs de la topologie différentielle. Sa théorie du cobordisme, pour laquelle il a reçu la médaille Fields au congrès d'Edinburgh en 1958, a révolutionné la compréhension de la géométrie globale des variétés différentiables et a permis l'épanouissement de la théorie des classes caractéristiques. Le lemme de transversalité de Thom est un outil géométrique d'une simplicité et d'une efficacité rares. Ses travaux sur la théorie des singularités, en particulier la classification de celles qui sont stables par petites déformations, l'ont conduit en 1969 à fonder la théorie des « catastrophes » qui deviendra connue du grand public en 1972 avec la publication de son ouvrage "Stabilité structurelle et morphogenèse". En utilisant de nouveaux outils mathématiques qualitatifs, d'origine géométrique, cette théorie permet de mieux comprendre certains phénomènes naturels discontinus et introduit un schéma d'analyse original, fondé entre autres sur la classification des singularités géométriques, dans des domaines très variés allant de la physique et la biologie (en particulier la morphogenèse) à la linguistique et la psychologie. Auteur d'une vision philosophique profondément originale, renouvelant la pensée aristotélicienne, René Thom est l'auteur de nombreux ouvrages dont les titres montrent l'ampleur de son œuvre :
Théorie des catastrophes et biologie, 1979
Paraboles et catastrophes, 1983
Esquisse d'une Sémiophysique, 1988
Modèles mathématiques de la morphogenèse, 1991
Prédire n'est pas expliquer, 1991

René Thom est l'un des rares mathématiciens de son époque à avoir mené aussi loin les conséquences de ses découvertes. La profondeur de son oeuvre mathématique et l'ampleur de sa pensée tant scientifique que philosophique font de René Thom l'un des grands savants du 20ème siècle ■ A.C.

Pierre Jacquinot

Né en 1910, Pierre Jacquinot fit des études particulièrement brillantes qui le conduisirent à être le plus jeune agrégé de physique en France. Il entra en 1933 au CNRS, où il orienta ses travaux de recherche vers la physique atomique. Il mit au point une nouvelle méthode, dite spectroscopie de Fourier, qui a marqué profondément les techniques utilisées en optique. Prenant en 1951 la direction du Laboratoire Aimé Cotton, Pierre Jacquinot en fit un pôle de renommée internationale en physique moléculaire.

De 1962 à 1969, Pierre Jacquinot est directeur général du CNRS. C'est une véritable mutation qui s'opère, grâce à lui, dans cet établissement. La création du concept de « laboratoires associés » établit un nouveau climat de coopération entre les Universitaires et le CNRS. En mettant en place à la tête du CNRS un collège de directeurs scientifiques qui assistent le directeur général dans les relations avec les laboratoires, il crée une réelle convivialité avec la communauté des chercheurs.

Pierre Jacquinot fut, pendant trente-six ans, un professeur chaleureux et convaincant. Il occupa la Chaire de spectroscopie de l'Université d'Orsay de 1957 à 1978. Il fut élu membre de l'Académie des sciences en 1966, et il en devint le président, très actif, en 1981-1982. Il reçut la médaille d'Or du CNRS en 1978.

Pierre Jacquinot laisse le souvenir d'un grand physicien et d'un administrateur qui a toujours eu le souci d'établir une chaleureuse confiance propre au développement harmonieux de la recherche ■ H.C.

Pierre Aigrain

Pierre Aigrain est l'un des physiciens qui ont le plus profondément marqué la recherche en France depuis cinquante ans. Il est un des pionniers de la physique des solides et ses travaux sur les semi-conducteurs ont été à la base de l'essor de l'électronique moderne. Son action au sein des plus hautes instances de l'Etat lui a permis d'orienter les programmes vers les pistes les plus fécondes de la recherche et de ses applications. A la fois proche des universitaires et des industriels, Pierre Aigrain, par son savoir, son intuition et son rayonnement personnel, s'était acquis admiration et amitié de tous.

Pierre Aigrain est né en 1924. Il entre à l'Ecole Navale en octobre 1942 : le sabordage de la Flotte à Toulon quelques semaines plus tard le laissera sans emploi ! A la Libération, la Marine l'envoie aux États-Unis pour une formation de pilote d'Aéronavale. Très vite il rejoint le Carnegie Institute of Technology à Pittsburgh, obtient un Ph. D. en génie électrique et revient en France en 1948 à l'instigation d'Yves Rocard, qui lui fait confiance pour créer un groupe de semiconducteurs au Laboratoire de physique de l'ENS. Le transistor vient d'être inventé (c'est le sujet de sa thèse française), une technologie révolutionnaire émerge, d'où vont sortir la microélectronique et l'informatique modernes. Aigrain va être le pivot de cette révolution en Europe. Bouillonnant d'idées, il ouvre de nombreuses voies nouvelles. Il est, par exemple, le premier à suggérer un laser semi-conducteur, ouvrant ainsi la voie de l'optoélectronique. Son laboratoire devient rapidement un acteur majeur au plan international. Son imagination débordante est partout célèbre : on se souvient encore des chercheurs de Bell Labs faisant la queue pour demander son avis à Murray Hill !

En même temps, Pierre Aigrain noue des contacts étroits avec le monde industriel : son groupe sera la pépinière de toute l'industrie des semiconducteurs. C'est lui qui forme les premiers ingénieurs, qui suscite les percées technologiques : son enthousiasme est communicatif ! D'une générosité hors du commun, il sème à tout vent, laissant aux autres le bénéfice de ses idées, parfois farfelues, souvent profondes. Homme de science, certes, mais aussi homme d'action ! Très tôt Aigrain oeuvre pour défendre le renouveau de la science française, durement éprouvée par les années de guerre, prisonnière de traditions souvent étouffantes. Convaincu que la recherche fondamentale est le ferment des applications futures, il convainc la Défense Nationale de la soutenir, au sein de la Direction de la Recherche et des Moyens d'Essai. C'est le début d'une période faste, où l'enthousiasme et l'imagination ne sont pas bridés par la bureaucratie. Les responsabilités d'Aigrain vont aller croissant, à la DGRST, à la Direction des Enseignements Supérieurs, jusqu'à sa nomination comme Secrétaire d'État à la Recherche. Peu à peu il va quitter la physique pour virer franchement vers l'industrie - mais sa curiosité ne se démentira jamais : le voir débarquer dans un laboratoire était toujours une expérience ! A l'écart du monde politique après 1981, il se consacre surtout à la construction d'un espace scientifique européen. Son rôle à Bruxelles sera essentiel.

Personnage atypique, Pierre Aigrain est l'un de ceux qui ont fait renaître la science française après la guerre. Son rayonnement sur la physique française est considérable. Tous ceux qui ont eu la chance de travailler avec lui savent ce qu'ils lui doivent ! ■ P.N.

Médaille d'or du CNRS

Le CNRS a décerné cette année la médaille à Claude Lorius, Membre de l'Académie des sciences, Directeur de recherche émérite au CNRS, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement et à Jean Jouzel, Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace, Directeur de recherche au CEA, pour leurs travaux sur l'étude des archives glaciaires « gelées » au sein des calottes polaires, notamment en Antarctique.
Ces chercheurs ont, pour la première fois, mis en évidence le lien entre teneur en gaz à effet de serre et évolution du climat grâce à l'analyse des bulles d'air présentes dans la glace. Leurs travaux ont contribué à la prise de conscience de l'influence potentielle des activités humaines sur l'évolution future du climat de la planète ■



la lettre de l'Académie des sciences n° 7 / printemps 2003

Publication de l'Académie des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel : 01 44 41 43 68
Fax : 01 44 41 43 84
http : www.academie-sciences.fr

Directeur de publication :
Nicole Le Douarin

Directoire :
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef :
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction :
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Direction artistique
Nicolas Guilbert

Photographies :
p.p. 1, 3, 8,10, 12, 14, 20
photos N. Guilbert
pp. 2, 3, 8, 9, 10, 12, 14, 17, (DR).

Comité de rédaction :
Jean-François Bach, Roger Balian, Jack Blachère, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro,
Jules Hoffmann, Alain Pompidou, Pierre Potier, Éric Spitz,
Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression :
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

n° de C.P. : 0108 B 06337